

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 15. № 5

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — Т. 15. — № 5. — 200 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

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

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

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

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

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

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

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

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



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2023

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.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,
ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 723**

Дерябин В. В. Нейросетевой метод определения места судна
по рельефу дна..... 723

Акмайкин Д. А., Бочарова В. В., Ключева С. Ф. Моделирование
маршрута судна с помощью кластерного анализа 735

Фирсов Ю. Г., Позенкова Д. А. Задачи батиметрической съемки
и картографического обеспечения высокоширотных трасс
Северного морского пути в Восточно-Сибирском море 744

Киджи Д. С. Обзор схем транспортно-географического
районирования акватории Арктики..... 767

Гарибин П. А., Егоров С. В., Буцаец А. А. Некоторые проблемы
обследования плавучих причалов яхтенных марин..... 783

Решняк В. И., Чиков Е. П., Решняк К. В. Обеспечение экологической
безопасности внутренних водных путей при использовании
внесудовых природоохранных технических средств 798

Моргунов К. П. Оценка результатов работ по укреплению грунтов
основания шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала
и предложения по стабилизации положения его камеры 806

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 820**

Кузнецов Р. В., Чистов В. Б., Вихров Н. М. Особенности
гидродинамического расчета высоконагруженных подшипников
скольжения тяжелых судовых редукторных передач 820

Мосейко Е. С., Ольховик Е. О., Никифоров В. Г. Применение
структурных методов для оценки надежности судовых механических
систем..... 834

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) 845

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Эффективность ограничения выбросов оксидов азота системами рециркуляции отработавших газов судовых ДВС..... 845

Крюков А. А., Куличков С. В., Ратников А. А. Моделирование потерь энергии в центростремительной турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса 858

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ 867

Коробейников А. Г., Нырков А. П. Математическое моделирование робастной системы автоматического управления магнитной левитации с неопределенными параметрами..... 867

Триполец О. Ю. Расчет маневра расхождения двух безэкипажных судов путем минимизации функции стоимости в компьютерной среде MATLAB..... 876

Голоскоков К. П., Коротков В. В., Астапович А. А. Определение оптимального периода контроля вычислений в комплексах программ автоматизированных систем управления 885

Бурков Д. Е. Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования 893

Чертков А. А., Каск Я. Н., Иванюк В. Ю. Модальный синтез наблюдателей переменных состояния судовых динамических систем..... 903

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 723

Deryabin V. V. Neural network-based method for determining vessel position by seabed relief 723

Akmaykin D. A., Bocharova V. V., Klyueva S. F. Ship route simulation based on the cluster analysis 735

Firsov Yu. G., Pozenkova D. A. The tasks for bathymetric investigations and cartographic support of the northern sea high latitude routes in the East Siberian Sea..... 744

Kidzhi D. S. Review of schemes for transport-geographical zoning of the Arctic water area 767

Garibin P. A., Egorov S. V., Butsanets A. A. Some issues of surveying floating berths of yacht marinas 783

Reshnyak V. I., Chikov E. P., Reshnyak K. V. Ensuring the environmental safety of inland waterways by using off-board environmental technical means 798

Morgunov K. P. Assessing the results of work on strengthening the soils of the foundation of lock № 5 of the Volga-Don shipping canal and proposals for stabilizing the chamber position..... 806

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 820

Kuznetsov R. V., Chistov V. B., Vikhrov N. M. Features of hydrodynamic calculation of highly loaded plain bearings of heavy ship's gears..... 820

Moseyko E. S., Ol'khovik E. O., Nikiforov V. G. Application of structural methods to assess the reliability of ship's mechanical systems 834

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 845

Zhivljuk G. E., Petrov A. P. Efficiency of limiting nitrogen oxides emissions by exhaust gas recirculation systems of marine internal combustion engines..... 845

Kryukov A. A., Kulichkov S. V., Ratnikov A. A. Simulation of energy losses in an inflow turbine with partial blading of the runner..... 858

Volume 15. № 5

2023

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

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	867
<i>Korobeynikov A. G., Nyrkov A. P.</i> Mathematical modeling of robust automatic control system of magnetic levitation with uncertain parameters	867
<i>Tripolets O. Y.</i> Calculating a collision avoidance maneuver for two unmanned ships by minimizing a cost function in MATLAB	876
<i>Goloskokov K. P., Korotkov V. V., Astapkovich A. A.</i> Determination of the optimal period for computations control in complexes of automated control systems programs	885
<i>Burkov D. E.</i> Application of ship's information system to control and monitor the technical condition of ship's equipment	893
<i>Chertkov A. A., Kask Ya. N., Ivanyuk V. Yu.</i> Modal synthesis of observers of state variables of ship dynamical systems	903

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734

NEURAL NETWORK-BASED METHOD FOR DETERMINING VESSEL POSITION BY SEABED RELIEF

V. V. Deryabin

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

A seabed relief-based vessel position fixing model on the basis of a four-layered feedforward neural network is proposed. Hidden neurons have hyperbolic tangent activation functions. The model is constructed for 1-D case that can be considered as vessel motion throw a narrow channel or alongside fairway axis. A sequence of spot soundings is given for the network input. The linear coordinate registered for the last sounding forms the network output. The training set is formed by means of the intentional pseudorandom alteration of input samples in accordance with suspected limits of sea level variations and the constant error of its measurements. The validation set is not used. The Adamax algorithm is implemented for the neural network training. The maximum of absolute value of the prediction error is used as a performance criterion of the net. Modeling has been conducted with the Python programming language. The Tensorflow library is used for the creation, training and testing of the neural network. The depth is modelled as a piecewise polynomial function of the coordinate. The results of neural network testing with the use of noised input samples let to state that the neural net can determine a ship position by means of soundings with acceptable accuracy. Different combinations of the sea level error and the number of hidden neurons have been considered. For each of such combinations the network accuracy indicators have been calculated. The best results are obtained for the network with 100 hidden neurons per each layer.

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

For citation:

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.

УДК 656.61.052:527.62:004.032.26

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА СУДНА ПО РЕЛЬЕФУ ДНА

В. В. Дерябин

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

Предложена модель определения места судна по рельефу дна на основе нейронной сети прямого распространения с четырьмя скрытыми слоями. Нейроны скрытого слоя обладают функциями активации в виде гиперболического тангенса. Данная модель реализована для одномерного случая, соответствующего движению судна в узком канале или вдоль оси фарватера. На вход сети поступает последовательность глубин, измеренных эхолотом, на выходе получается значение линейной координаты судна на момент измерения последней глубины. Обучающая выборка формируется путем целенаправленного случайного видоизменения входных образцов в соответствии с предположением о допустимых пределах колебаний уровня моря, а также постоянной ошибки его измерения. Контрольная выборка не используется. Для настройки свободных параметров нейронной сети применяется метод Adamax. В качестве критерия точности нейронной сети используется наибольшее значение модуля ошибки координаты на обучающей выборке. Моделирование выполнялось на языке программирования Python. Для создания, настройки и тестирования

нейронной сети также использовалась библиотека *Tensorflow*. Глубина акватории представлена в виде кусочно-полиномиальной функции координаты. Результаты тестирования нейронной сети с использованием искаженных входных сигналов позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть определяет место судна по глубинам с удовлетворительной точностью. Рассмотрены различные комбинации значений ошибки уровня моря и количества нейронов в каждом из скрытых слоев. Для каждой такой комбинации вычислены показатели точности, характеризующие работу нейронной сети. Наилучшие результаты получены для архитектуры, содержащей по 100 нейронов в каждом скрытом слое.

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

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

В качестве автономной альтернативы спутниковых навигационных систем могут быть рассмотрены методы корреляционно-экстремальной навигации, использующие информацию о рельефе местности для определения местоположения подвижных объектов. С точки зрения судовождения практически востребованными являются методы определения судна по рельефу дна, особенно те из них, которые предполагают использование обычного эхолота, входящего в состав навигационного оборудования морских судов валовой вместимостью 300 и более в соответствии с Конвенцией СОЛАС. Как известно из [1] и [2], поисковые методы корреляционно-экстремальной навигации предъявляют, как правило, высокие требования к вычислительным ресурсам бортового компьютера, так как процедура поиска выполняется в режиме реального времени. Чем больше база исходных данных, по которой выполняется поиск, тем более быстрым должен быть поисковый алгоритм.

Проблема скорости реализации поисковых методов в корреляционно-экстремальной навигации делает актуальной задачу повышения быстродействия существующих или разработку новых алгоритмов. С точки зрения быстродействия перспективным представляется использование нейронных сетей, которые известны своим свойством приближения функций многих переменных с любой наперед заданной точностью. Указанные свойства хорошо изучены и доказаны математически [3]–[5]. При этом следует иметь в виду, что речь идет, в первую очередь, о сетях прямого распространения с полными связями, имеющими один или более скрытый слой. Предполагается, что нейронная сеть может запомнить существующую зависимость координаты от последовательности глубин, записанных через определенный интервал времени, и указанная зависимость будет сохраняться в коэффициентах сети. Таким образом, для рабочего режима нет необходимости использовать весь исходный массив данных, который имеет, как правило, очень большие объемы, замедляющие работу алгоритмов, основанных на поиске с использованием таких данных. Быстродействие нейронной сети будет определяться количеством сводных параметров (весовых коэффициентов и пороговых смещений), настраиваемых на этапе ее обучения.

Возможности нейронных сетей для решения задач корреляционно-экстремальной навигации использованы в ряде исследований. Например, в [6] нейронные сети применяются для прогнозирования временных рядов, элементы которых представляют собой энергетические характеристики рельефа местности. В статье [7] на основе нейронной сети определяются координаты места судна, при этом в качестве навигационных ориентиров выступают гидроакустические и магнитные маячки, установленные на поверхности дна. Существуют также подходы, связанные с решением схожей задачи — моделированием геометрии рельефа дна. Так, в [8] геометрия рельефа местности представляется в виде нейронной сети, определяющей высоту точки, если известны ее горизонтальные координаты, т. е. сеть аппроксимирует функцию двух переменных. В исследовании [9] рассматриваются вопросы представления участка подводной поверхности на основе двумерной сплайновой аппроксимации. Сплайны также могут иметь нейросетевую интерпретацию (см., например, [10]). Другие подходы к решению задач навигации по рельефу дна изложены, например, в работах [11]–[13].

Общим для указанных исследований является то, что их конструкции на базе нейронных сетей используются в качестве вспомогательных инструментов, не позволяющих непосредственно решать задачу прогноза координат судна на основе данных, поступающих от обычного эхолота судна. В статье [14] отмечается данный факт и предложена нейросетевая модель определения координаты судна на основе последовательности производной глубины, измеряемой эхолотом. Подход на основе производных был выбран в связи с тем, что уровень глубины акватории может меняться, а производная глубины остается вне влияния подобных изменений. Тем не менее эхолот измеряет глубину, а производная получается тем или иным методом численного дифференцирования, что добавляет погрешность и дополнительные проблемы, связанные с выбором его вида и параметров. В настоящей статье предлагается подход, не использующий численное дифференцирование глубины, но позволяющий тем не менее учитывать колебания уровня моря для акватории, где применяется батиметрическая навигация.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи. Как и в статье [14], будем рассматривать одномерный случай, что соответствует движению судна вдоль оси узкого прохода или фарватера. По-прежнему, на этапе промеров при помощи эхолота измеряется генеральная последовательность глубин d , из которой определяются подпоследовательности, состоящие из p глубин вида: $\{D\} = d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}$, где $k = 0, 1, 2, \dots, n - p + 1$, где n — общее количество измерений глубины на данном участке акватории. Также формируется генеральная последовательность координат $x_0 = 0, x_1, x_2, \dots, x_n$. Необходимо в режиме плавания судна найти в генеральной последовательности глубин подпоследовательность $\{D\}$, наиболее «похожую» на текущую, для которой значение координаты x_{k+p-1} известно. В качестве меры близости текущей последовательности глубины к записанной целесообразно выбрать расстояние Евклида. Иными словами, можно утверждать, что существует функциональная зависимость $x_{k+p-1} = f(d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1})$.

Конечно, функциональное преобразование $f(\cdot)$ может быть не всегда однозначным, что зависит от формы рельефа дна, т. е. приблизительно одинаковым последовательностям $\{D\}$ может соответствовать различное значение координаты, что соответствует повторяющемуся рельефу. Тем не менее будем считать такое поведение рельефа скорее исключением, т. е. функцию $f(\cdot)$ более или менее однозначной. Вопросы неоднозначности рассмотрим позднее. Будем искать решения реализации функционального преобразования $f(\cdot)$ на основе теории нейронных сетей, которые позволяют решать задачи приближения функций.

Архитектура нейросети. Из теории нейронных сетей известно, что нейронная сеть с одним скрытым слоем способна аппроксимировать произвольную непрерывную функцию нескольких переменных с любой наперед заданной точностью. Указанное утверждение иногда называют теоремой об универсальной аппроксимации. К сожалению, данная теорема не конструктивна, так как не дает способа нахождения архитектуры, которая обладает заданными аппроксимирующими свойствами. Основная проблема заключается в выборе количества нейронов скрытого слоя. Кроме того, выбор функций активации тоже не всегда однозначен, так как теорема об универсальной аппроксимации обязывает их лишь не быть полиномами. Как правило, для нейронов скрытого слоя используются функции активации в виде гиперболического тангенса, а для нейронов выходного слоя — тождественные функции активации (они отображают вход и выход без изменений). Проблема количества нейронов скрытого слоя осложняется также видом той функции, которая планируется быть приближенной нейронной сетью, а вид функции, как правило, остается неизвестным.

Несмотря на то, что одного скрытого слоя теоретически достаточно, чтобы выполнять аппроксимацию той или иной функциональной зависимости, его размер (количество нейронов) может оказаться слишком большим для решения данной задачи, что, в свою очередь, замедлит процесс обучения или сделает его совсем невозможным (в зависимости от имеющихся аппаратных возможностей). Как показал ряд исследований (см., например, [15] и [16]), для некоторых классов аппроксимируемых функций глубокая архитектура может обеспечить такую же точность, как и мелкая,

но при этом настраиваемых параметров (весов и порогов) будет меньше, что может, во-первых, ускорить процесс обучения и, во-вторых, позволит увеличить скорость вычислений в рабочем режиме.

Учитывая ранее изложенное, в рамках настоящего исследования, в отличие от работы [14], используется нейронная сеть не с одним, а с четырьмя скрытыми слоями, т. е. глубокая нейронная сеть. В качестве функций активации нейронов скрытых слоев использовался гиперболический тангенс. Функция активации нейрона выходного слоя тождественная. Каждый скрытый слой содержит несколько нейронов, количество которых варьируется в соответствии со следующей последовательностью: 100, 200, ..., 500. Общий вид архитектуры приведен на рис. 1.

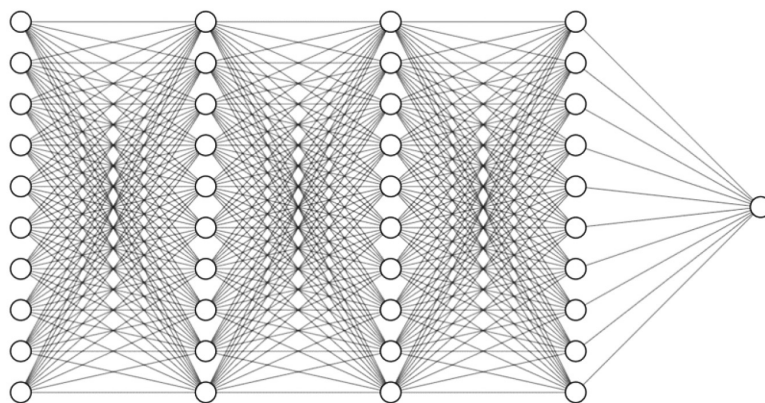


Рис. 1. Архитектура нейронной сети — общий вид
(входной слой не показан)

Вектор входного и выходного сигналов определяется в соответствии с зависимостью $f(\cdot)$, т. е. на вход поступает подпоследовательность p глубин, а с выхода снимается значение координаты судна на момент взятия последней глубины.

Набор учебных данных. Как известно, для обучения нейронной сети необходимы образцы. Количество и качество образцов определяет степень точности, с которой нейронная сеть будет отображать представляемую ими функциональную зависимость. В данной ситуации количество образцов ограничено объемом общей последовательности глубин, измеренных на стадии предварительных промеров. Упорядочим образцы в виде входной матрицы F и выходного вектора Y следующим образом. Входная матрица содержит своими строками подпоследовательности глубин, выходной вектор — соответствующие им координаты. Приведем пример. Пусть 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 — последовательность глубин и $p = 5$, которой соответствует последовательность координат 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90. В данном случае входная матрица имеет следующий вид:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{pmatrix},$$

а выходной вектор $Y = (50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90)^T$. Входная матрица и выходной вектор являются удобной формой хранения данных для обучения нейронной сети. Они формируются по результатам предварительных промеров глубин на заданной акватории.

На первый взгляд, может показаться, что принцип формирования набора учебных данных определен. На самом деле, он не учитывает влияние двух факторов. Во-первых, измеренные глубины могут иметь погрешности их определения при помощи эхолота (причем как на стадии промеров, так и на стадии навигации). Во-вторых, не учитываются колебания уровня моря, которые, в свою очередь, могут быть вызваны приливными и ветровыми (сгонно-нагонными) явлениями. В принципе, результирующая погрешность может рассматриваться как сумма двух ошибок, вызванных

указанными причинами. Особенно если ошибки измерений глубины носят постоянный характер. Например, погрешность измерения всех глубин на этапе промера составляет $-0,1$ м, на этапе навигации — $+0,5$ м, а уровень моря увеличился на 1 м. В итоге в режиме навигации придется иметь дело с последовательностью, каждый элемент которой будет на 1,6 м больше, чем он был зафиксирован тогда, когда выполнялись предварительные промеры.

Во избежание указанных проблем предлагается следующий прием. Необходимо сделать r дубликатов матрицы F . Дубликат представляет собой сумму исходной матрицы F с матрицей, каждый элемент которой содержит случайное число, принимающее значение по закону равномерного распределения из промежутка $[-1; +1] \cdot e$, где e — ошибка уровня глубины. Как отмечалось ранее, e включает как действительные колебания уровня моря, так и постоянную ошибку измерений. С каждым дубликатом входной матрицы F выходной вектор Y рассматривается без изменений. В результате набор учебных данных расширяется в r раз. Он не содержит «чистые» входные образцы, а только измененные случайным образом. Предполагается, что создание видоизмененных входных образцов с сохранением выходных без изменений должно обеспечить устойчивость нейронной сети к колебаниям уровня моря. Параметрами алгоритма формирования учебных данных являются два числа: r и e .

Следует заметить, что предлагаемый метод формирования набора учебных данных не предполагает наличия контрольной выборки, используемой для контроля обобщающих свойств сети в процессе обучения. Указанное обстоятельство может показаться странным. Дело в том, что причиной переобучения сети является малый объем учебных данных по отношению к ее свободным параметрам (весовым коэффициентам). Сеть просто «запоминает» данную конкретную выборку и для нее она работает очень хорошо, но если выборку несколько видоизменить, то сеть начинает плохо работать. Предлагаемый метод как раз и предполагает видоизменения исходной выборки, поэтому при условии большого количества таких видоизменений можно надеяться, что эффект от переобучения не окажет существенного влияния на качество работы нейросети. Конечно, вопрос выбора r может быть решен лишь опытным путем.

После получения обучающих примеров по типу «вход-выход» они были нормализованы, т. е. сделано так, чтобы они принимали значения от -1 до $+1$. Наибольшее значение глубины для масштабирования определяется как сумма наибольшего значения глубины из модельной выборки и величины e . Наименьшее — как разность наименьшего значения глубины и величины e . Наименьшее значение координаты для масштабирования выбрано равным нулю. Наибольшее — наибольшему значению координаты, достигнутому на момент окончания плавания судна. Выбор промежутка масштабирования $[-1; 1]$ не имеет точного математического обоснования несмотря на то, что такой промежуток часто используют некоторые среды моделирования по умолчанию, если скрытые нейроны имеют в качестве функции активации гиперболический тангенс. Дело в том, что тангенс гиперболический имеет областью своих значений отрезок $[-1; 1]$, т. е. выход любого нейрона принадлежит указанному отрезку, и от каждого входа также поступает значение от -1 до 1 , что придает единообразие, если совокупность входных сигналов рассматривать (что иногда и делают) как некоторый входной слой.

Алгоритм обучения. Для обучения нейронных сетей применяют методы нулевого, первого и второго порядков. Методы нулевого порядка применяются, когда нет возможности вычислить градиент целевой функции ошибки. Подобная ситуация возникает, например, когда функция ошибок не имеет аналитически выраженных производных по отношению к весам сети. Методы первого порядка основаны на вычислении градиента. Методы второго порядка используют дополнительно информацию, выражающуюся вторыми производными минимизируемой целевой функции. Как правило, сходимость методов нулевого порядка небыстрая, да и градиент известен, поэтому использовать их особого смысла нет. Методы второго порядка эффективны, но предъявляют повышенные требования к оперативной памяти, так как предполагают пакетный режим обучения. В связи с изложенным наиболее оптимальными представляются методы первого порядка. В библиотеке TensorFlow (v. 2.10.0), точнее в ее надстройке Keras, имеется несколько алгоритмов обучения, начиная от простейшего стохастического градиента (SGD), заканчивая более совершенными (Adagrad,

RMSprop, Adadelta, Adam). Алгоритм SGD использует в общем случае идею инерционности, позволяющей преодолевать локальные минимумы. Методы Adagrad и RMSprop используют идею индивидуальной настройки каждого коэффициента нейронной сети в зависимости от поведения градиента. В алгоритмах Adadelta и Adam использованы обе указанные идеи.

Известна также модификация алгоритма Adam – Adamax [17], который хорошо себя проявил при решении задачи обучения в [14], поэтому был выбран в роли алгоритма настройки нейронной сети. Коэффициент скорости обучения (`learning_rate`) установлен 0,001, что соответствует значению по умолчанию в TensorFlow. Остальные параметры алгоритма обучения (коэффициенты забывания для производной ошибки и ее квадрата и др.) также взяты по умолчанию. Так как алгоритм предполагает реализацию в минипакетном режиме, то размер мини-пакета выбран равным 100. Следует отметить, что Adamax рассматривается как метод оптимизации коэффициентов нейронной сети. В качестве целевой функции, подлежащей минимизации, для него выбран традиционный средний квадрат ошибки, который очень удобен для вычисления производных на этапе реализации алгоритма обратного распространения. Однако указанный показатель не исключает выбросов в виде больших ошибок прогноза, так как обеспечивает лишь удовлетворительную среднюю точность. В задаче прогноза координаты судна подобного рода ошибки недопустимы и более привлекательным представляется такой показатель как наибольшее значение модуля ошибки. Однако наибольший модуль ошибки минимизировать в рамках алгоритма обратного распространения затруднительно, так как возникают сложности определения производной такой целевой функции. Тем не менее контролировать данный показатель все же можно, например, после определенного количества итераций, на каждой из которых настройка нейронной сети осуществляется в соответствии с критерием средней квадратической ошибки в рамках Adamax.

Таким образом, полная процедура обучения включает два процесса: собственно настройку коэффициентов нейронной сети методом Adamax и периодический контроль точности прогноза в соответствии с критерием наибольшего значения модуля ошибки. Как отмечалось ранее, критерий рассчитывается для той же выборки, которая используется для настройки, так как контрольная выборка не формируется.

Результаты (Results)

Компьютерное моделирование проводится в целях проверки работоспособности изложенных ранее теоретических предположений. Рассматривается движение судна с постоянной скоростью вдоль прямой оси некоторого маршрута, пересекающей 20 участков, на каждом из которых глубина изменяется в зависимости от координаты как многочлен второй степени. При этом для каждого участка задаются случайным образом свои коэффициенты многочлена с учетом следующих ограничений:

- минимальная глубина на каждом участке обязательно должна достигнуть значения диапазона от 50 до 70 % среднего уровня глубины (принимается равным 10 м);
- максимальная глубина на каждом участке обязательно должна достигнуть значения диапазона от 130 до 150 % среднего уровня глубины;
- глубина на границах участков не меняется скачкообразно, хотя такое поведение и может наблюдаться в действительности.

Коэффициенты полинома, моделирующего зависимость глубины от координаты, выбираются случайным образом по закону равномерного распределения из диапазона от $-0,01$ до $0,01 \text{ м}^{-1}$ (для старшего коэффициента) и от $-0,1$ до $0,1$ (для линейного коэффициента). Выбор осуществляется для каждого сегмента маршрута с проверкой выполнения указанных ранее условий, касающихся экстремальных значений глубины. Если условия для рассматриваемого сегмента не выполняются, то происходит новый выбор значений коэффициентов до тех пор, пока глубина не будет изменяться в желаемых пределах. Иными словами, случайный выбор коэффициентов моделирующего полинома происходит на итерациях бесконечного цикла, критерием выхода из которого служат указанные условия, касающиеся экстремальных значений глубины.

Моделирование выполняется в среде Spyder в комбинации с Python. В итоге получается генеральная выборка координаты судна и генеральная выборка глубины. Для формирования набора

учебных данных используется $p = 301$ значений глубин, т. е. нейронная сеть принимает на вход последовательность, состоящую из 301 измеренных глубин, и прогнозирует значение координаты на момент последнего измерения глубины. Предположим, что измерения поступают через 1 м, тогда выбранное число точек соответствует длине траектории 300 м. По наблюдениям глубины за последние 300 м сеть выдает оценку координаты на текущий момент времени. Образцы формируются с использованием следующих значений параметров: $r = 500$ и $e = 1, 2, \dots, 5$ м. Таким образом, создается 500 дубликатов входной матрицы F , а уровень ошибки принимает различные значения.

Обучение нейронной сети выполнялось на протяжении 1000 эпох (циклов коррекций), на каждой из которых контролировался максимум модуля ошибки на обучающей выборке. Лучшее состояние сети сохранялось в соответствии с указанным критерием. График процесса обучения (для $e = 5$ м) приведен на рис. 2, а. Оптимальное значение критерия (22,2 м) было достигнуто на 724 эпохе (итерации). Как видно из рисунка, поведение указанного критерия имеет скачкообразный мало предсказуемый характер, т. е. наряду с низким уровнем ошибки, который наблюдается начиная примерно с пятидесятой итерации, имеет место резкий рост уровня, причем подобного рода скачки сохраняются до конца обучения. Совершенно иначе ведет себя минимизируемая в рамках Adama целевая функция — половина среднего квадрата ошибки. Соответствующий график представлен на рис. 2, б, откуда видно, что кривая обучения имеет преимущественно плавный, асимптотический характер, хотя наименьшее значение достигается на 908 итерации, а не на 1000. Расхождение кривых обучения для различных критериев точности подтверждает правильность идеи контроля максимального модуля ошибки на каждой итерации, так как для одного и того же состояния нейросети различие критериев точности может быть очень большим, и ориентироваться только на традиционную кривую обучения (см. рис. 2, б) неправильно.

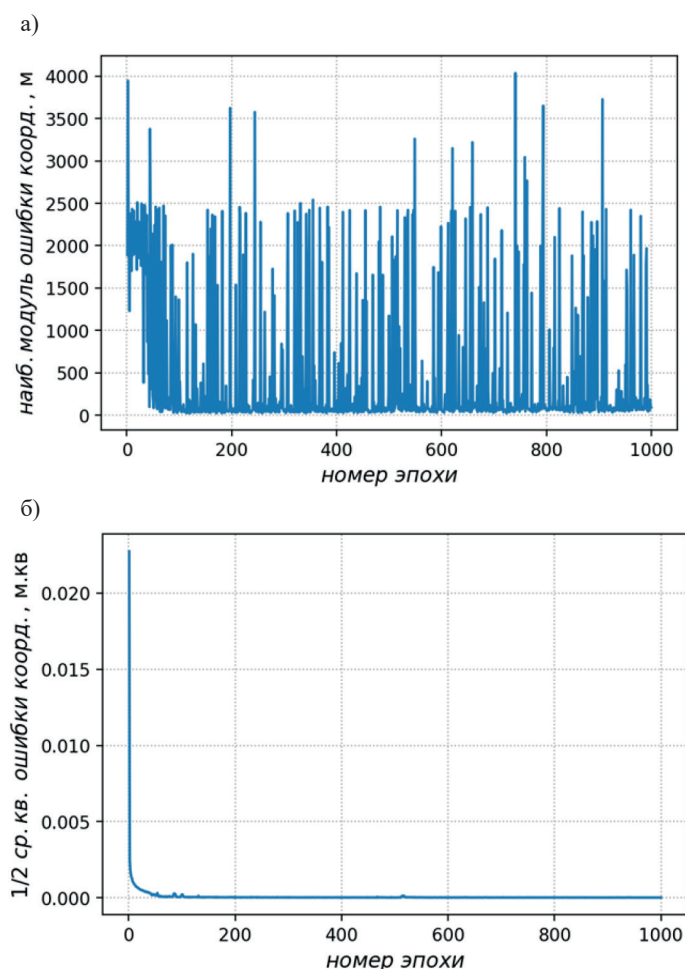


Рис. 2. Графики процесса обучения: а — наибольший модуль ошибки; б — половина среднего квадрата ошибки

После обучения нейронная сеть проходила тестирование на образцах, которые не были включены в обучающую выборку, но были сформированы точно также, с использованием случайного значения e . Количество тестовых ситуаций — 1000. Результаты сведены в таблицу, в которой приводятся характеристики точности нейронной сети в формате X / Y , где X — среднее значение модуля ошибки прогноза координаты (в метрах), а Y — наибольшее значение модуля ошибки прогноза координаты (в метрах).

Результаты обучения нейронной сети

Ошибка уровня моря e , м	Число нейронов в каждом скрытом слое				
	100	200	300	400	500
1	3,0/23,8	3,1/73,4	3,5/169,4	3,9/202,5	6,2/172,7
2	1,9/17,0	2,5/28,6	3,7/37,7	2,9/43,3	3,8/85,1
3	2,0/ 15,0	1,9/31,0	3,5/49,9	4,3/60,0	4,0/75,0
4	1,4/19,3	2,8/25,8	2,6/30,8	3,6/47,8	5,5/51,2
5	2,1/17,9	2,3/25,8	3,6/41,9	3,9/53,2	5,6/54,4

Характеристики точности приводятся с округлением до одного десятичного разряда после запятой. Жирным шрифтом выделены лучшие результаты для каждого значения ошибки уровня e .

Обсуждение (Discussion)

Результаты, приведенные в таблице, показывают, что нейронная сеть успешно справляется с поставленной изначально задачей — прогнозирует координату судна с хорошей точностью в условиях колебания уровня моря и постоянных ошибок измерений, причем в смысле наибольшего значения модуля ошибки. Например, промеры проводились при одном уровне моря, и даже если он изменяется на ± 5 м, то нейронная сеть все равно с хорошей точностью прогнозирует координату. Погрешность 17,9 м при общей протяженности маршрута около 6000 м представляется довольно точным результатом. Относительная погрешность получается не более 0,3 %. Средняя точность вообще находится на практически идеальном уровне. При этом не используются производные глубины, а только ее непосредственные значения, и проблема ошибок численного дифференцирования исчезает.

Увеличение количества нейронов в скрытых слоях не приводит к увеличению точности: она как правило, падает. Указанное справедливо для обеих характеристик точности. Данное обстоятельство может быть объяснено тем, что количество образцов слишком мало в соотношении с количеством настраиваемых параметров сети. В связи с этим целесообразно увеличить количество образцов, например, используя 1000 дубликатов матрицы F вместо 500. Для архитектуры с количеством нейронов 100 в каждом скрытом слое процесс обучения был повторен для ошибки уровня $e = 5$ м. В результате тестирования характеристики точности составили 1,9/21,1 м, что незначительно отличается от данных таблицы с учетом того, что уровень ошибки при тестировании был занижен и составлял $e = 4$ м. Возможно, для нового объема учебных данных необходимо больше циклов обучения. Их количество было также увеличено до 2000, что не позволило, однако, улучшить показатели точности работы нейронной сети.

Неудавшаяся попытка увеличения точности нейронной сети путем увеличения объема учебных данных и эпох справедлива только для архитектуры, каждый скрытый слой которой содержит по 100 нейронов. Возможно, применение указанных действий для сетей с большим количеством нейронов будет иметь более видимый эффект, но ввиду хорошей точности для архитектуры с наименьшим числом нейронов, аналогичные эксперименты для других вариантов не проводились. Следует также отметить, что после каждого варианта обучения фиксировались и показатели точности для так называемой *идеальной выборки*, т. е. для которой использовались глубины, измеренные эхолотом на этапе предварительных промеров. Как отмечалось ранее, для настройки использовалась не идеальная выборка (сама входная матрица F), а только ее зашумленные дубликаты. Тем не менее показатели точности для нее находились приблизительно на уровне тех, которые приведены в соответствующих ячейках таблицы результатов.

Исходя из практических соображений, возникает закономерный вопрос: «какую же из сетей, приведенных в таблице, необходимо брать для использования?». В первую очередь, необходимо определиться с возможным уровнем ошибки e исходя, например, из статистической информации для данного района моря, а также предполагаемого уровня погрешностей измерений, затем выбрать сеть с тем количеством нейронов, которое обеспечивает наименьшую максимальную ошибку прогноза. В данном случае для любого уровня ошибки e наилучшая точность обеспечивается нейронной сетью, каждый скрытый слой которой содержит по 100 нейронов. Можно, конечно, взять конфигурацию сети с максимальным уровнем $e = 5$ м, так как точность для каждого e примерно одинакова, но 1000 тестовых ситуаций более низкий уровень e покрывают более плотно, т. е. чем ниже e , тем выше достоверность тестирования при неизменном количестве тестовых ситуаций. Таким образом, следует выбирать уровень ошибки e исходя из реально возможной величины колебаний уровня моря и ожидаемой предельной ошибки получения глубины.

Анализируя применимость предлагаемого метода батиметрической навигации, необходимо учитывать ряд обстоятельств. Во-первых, метод будет хорошо работать только для тех участков акватории, подводный рельеф которых имеет уникальный, ярко выраженный и неповторяющийся характер. Действительно, навигация по глубинам с идеально плоским горизонтальным дном вряд ли возможна. Во-вторых, метод навигации по глубинам будет работать, если текущая форма рельефа дна не меняется существенным образом в промежутках времени между промерами. Например, для песчаных грунтов в районах с интенсивными течениями промерные работы должны производиться часто в отличие от каменистых и скалистых форм подводного рельефа. В-третьих, предлагаемый метод определения по глубинам, в принципе, должен работать без обязательной процедуры предварительных промеров как таковой, выполняемой специально для батиметрической навигации. Одним из вариантов является возможность использования информации о глубинах, содержащихся, например, в официальных электронных навигационных картах (ENC), точнее, в слое объектов SOUNDG. Другим вариантом является использование различных цифровых моделей рельефа дна [18], например, GEBCO, ETOPO, IBCAO и др., что, скорее, подходит для научно-исследовательских, а не навигационных целей. При этом взятие промеров будет моделироваться в соответствии с выбранной дискретностью. Точечные глубины будут, как правило, располагаться на некотором расстоянии от предполагаемых точек «виртуального» промера в узлах неравномерной сетки, в связи с чем необходимо применять соответствующие методы интерполяции, выбор которых не представляется всегда однозначным.

Необходимо указать ошибки, которые могут возникать в процессе использования предлагаемой батиметрической навигационной системы.

Во-первых, изменяющиеся во времени погрешности измерений будут искажать выборку, делая ее не похожей на ту, которая была зарегистрирована на этапе предварительных промеров. Причем влияние будут иметь именно изменяющиеся погрешности, так как постоянные учтены в величине e на этапе формирования обучающей выборки. Во-вторых, погрешность будет вносить несоответствие скоростей движения промерного и использующего систему судна. Конечно, судно, использующее батиметрическую навигационную систему, не обязано двигаться со скоростью промерного, так как всегда можно ввести масштабный коэффициент, изменяющий частоту регистрации глубин, но он равен отношению указанных скоростей, точность определения которых также конечна. В-третьих, даже если предположить отсутствие первых двух факторов ошибок, то всегда имеется и ошибка, заключающаяся в том, что измерения не обязательно будут выполнены в точности от тех же характерных точек дна, что и на стадии промеров. Причина заключается в невозможности идеальной стабилизации скоростей судов, так как всегда будут присутствовать некоторые ускорения, имеющие характер случайных флуктуаций. Как следствие, измеренная в промежуточных точках выборка будет отличаться от идеальной. В принципе, при достаточно подробных промерах влияние такой погрешности не должно быть существенным, так как точки фактических измерений на дне будут близки к используемым на стадии промеров, и вид последовательности глубин не исказится существенным образом.

Можно предположить, что если указанные погрешности не будут иметь характер промахов, приводящих к грубым искажениям последовательностей глубин, то нейронная сеть будет выдавать решение, близкое к наблюдаемому при использовании идеальной выборки глубин. Тем не менее задача определения допустимого уровня погрешностей получения входной последовательности представляется пока нерешенной.

Заключение (Conclusion)

Разработана модель определения местоположения судна по глубинам на основе глубокой нейронной сети прямого распространения с четырьмя скрытыми слоями. Сеть принимает на вход последовательность глубин, измеряемых эхолотом, а на ее выходе получается координата судна на момент последнего измерения глубины. В ходе тестирования показана устойчивость решения к колебаниям уровня моря и постоянным ошибкам измерения глубины, составляющим в сумме ± 5 м. Устойчивость обеспечивается путем случайного видоизменения входных образцов обучающей выборки при сохранении выходных без изменений. В процессе обучения сети контрольная выборка не используется. Лучшее состояние сети в процессе обучения сохраняется в соответствии с критерием наибольшего значения модуля ошибки прогноза. Непосредственная оптимизация коэффициентов нейронной сети осуществляется методом Adamax. Была исследована также зависимость точности работы нейросети от количества нейронов в скрытых слоях. Увеличением данного количества не удалось повысить точность модели. Также была предпринята попытка увеличения точности за счет увеличения объема обучающей выборки и увеличения количества эпох обучения, но заметных успехов добиться также не удалось.

Дальнейшие направления исследований могут проводиться в области разработки модели, работающей для наиболее важного для практики двумерного случая. Для одномерного случая достигнутую точность уже можно считать удовлетворительной. Одной из основных проблем, связанных с переходом к двумерной навигации по глубинам, является существенное увеличение объема учебных данных, так как при этом резко увеличивается количество возможных вариантов движения судна в пределах заданной акватории. Увеличение объема данных, в свою очередь, закономерно приводит к замедлению процесса обучения и повышению требований к вычислительным возможностям компьютерной техники. Двумерный случай не исключает также актуальную и для одномерного случая проблему неоднозначности решения, когда одной и той же последовательности глубин (на практике — нескольким похожим друг на друга) соответствует несколько различных местоположений судна. Повторяемость рельефа как минимум будет негативно сказываться на результатах обучения нейронной сети. Перспективным направлением исследований является также разработка метода определения пригодности рельефа для батиметрической навигации с учетом полученного решения на основе нейронной сети.

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 «Электронприбор», 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. Каменев А. А. Применение искусственных нейронных сетей при моделировании спектроэнергетических характеристик местности для систем технического зрения с корреляционно-экстремальными алгоритмами навигации / А. А. Каменев, А. Ю. Тонышев // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. — 2021. — № 1(76). — С. 259–262.

7. 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.
8. Боронников Д. А. Нейросетевой алгоритм организации пространственных данных о рельефе местности / Д. А. Боронников, Д. В. Пантюхин, С. В. Данько // *Известия МГТУ МАМИ*. — 2013. — Т. 1. — № 3 (17). — С. 157–164.
9. Ююкин И. В. Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
10. 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.
11. 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.
12. Ma T. AUV robust bathymetric simultaneous localization and mapping / T. Ma, Y. Li, R. Wang, Z. Cong, Y. Gong // *Ocean Engineering*. — 2018. — Vol. 166. — Pp. 336–349. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.029.
13. Norgren P. A multibeam-based SLAM algorithm for iceberg mapping using AUVs / P. Norgren, R. Skjeltne // *IEEE Access*. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 26318–26337. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2830819.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Абрамова А. С. Оценка точности общедоступных цифровых моделей рельефа дна океанов на примере участков покрытия многолучевой съемкой Норвежского и Баренцева морей / А. С. Абрамова // *Геодезия и картография*. — 2021. — Т. 82. — № 1. — С. 13–22. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-13-22.

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. Kamenev, A. A., and A. Y. Tonyshv. “The use of artificial neural networks in modeling the spectral-energy characteristics of the terrain for vision systems with correlation-extreme navigation algorithms.” *SPbNTORES: trudy ezhegodnoi NTK* 1(76) (2021): 259–262.
7. 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.
8. Boronnikov, D.A., D. V. Pantiukhin, and S. V. Danko. “Neural network algorithm of spatial relief data organization.” *Izvestiya MGTU “MAMI”* 1.3(17) (2013): 157–164.
9. Yuyukin, Igor V. “Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission of correlation-extreme navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.

10. 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.
11. 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.
12. Ma, Teng, Ye Li, Rupeng Wang, Zheng Cong, and Yusen Gong. "AUV robust bathymetric simultaneous localization and mapping." *Ocean Engineering* 166 (2018): 336–349. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.029.
13. Norgren, Petter, and Roger Skjetne. "A multibeam-based SLAM algorithm for iceberg mapping using AUVs." *IEEE Access* 6 (2018): 26318–26337. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2830819.
14. Deryabin, Victor V. "Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.2 (2023): 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Abramova, A.S. "Accuracy assessment of publicly available digital elevation models of the ocean floor, at the polygons of multibeam data coverage in the Norwegian and Barents Seas." *Geodesy and Cartography* 82.1 (2021): 13–22. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-13-22.

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 20 июня 2023 г.
Received: June 20, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-735-743

SHIP ROUTE SIMULATION BASED ON THE CLUSTER ANALYSIS

D. A. Akmaykin, V. V. Bocharova, S. F. Klyueva

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

The problem of safe ship's route planning at the variable hydrometeorological situation along the route is considered in the paper. The problem solved in the paper is based on the division of the water area into separate clusters, depending on its characteristics. The route from Busan Port to Kushiro Port is used as an example. The specifics of this route is that it runs through the open sea, and through the straits and archipelagos. The aim of the work is to automate the process of planning the route and adjusting it during the trip, depending on changes in external conditions. The graph theory for modeling a route is proposed in this paper. The construction of graphs is implemented using the cluster analysis method. In the analysis, the water area of the route is divided into separate subareas, depending on the distance to the coast and the depths difference. Open water areas are separated into larger clusters. Near the coast and at shallow depths, clustering is shorter. The cluster centroids are the vertices of the graphs of the future route. As result it is a simulation of graphs of different sizes. The union of graphs forms the hypergraph. The distance is used as the weight of the graph edges. To determine the most preferable route in criteria of speed, cost or safety, weights are added depending on weather and other factors. As a result of this approach, several routes are planning on the hypergraph. Depending on the weight of the priority criteria, a route is selected automatically. The proposed method can be used to create systems for automated planning of optimal routes, taking into account the selected criteria under changing environmental conditions in the process of voyage and replanning it if necessary.

Keywords: vessel safety, hydrometeorological parameters, pitching, sea waves, wind, sea surface, clustering.

For citation:

Akmaykin, Denis A., Victoria V. Bocharova, and Svetlana F. Klyueva. "Ship route simulation based on the cluster analysis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-735-743.

УДК 004.94, 656.61.052

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАРШРУТА СУДНА С ПОМОЩЬЮ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, С. Ф. Ключева

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского», г. Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является проблема прокладывания безопасного маршрута судна при изменении гидрометеорологической обстановки вдоль маршрута судна. Решение данного вопроса основано на разбиении акватории на отдельные кластеры, зависящие от ее характеристик. В качестве примера в статье используется маршрут от порта Пусан до порта Кусиро. Особенность данного маршрута в том, что он пролегает через открытое море, через проливы и архипелаги. Целью работы является автоматизация процесса прокладки маршрута и корректировки его в процессе движения в зависимости от изменения внешних условий. Предложено моделирование маршрута на основе теории графов. Построение графов реализуется с помощью метода кластерного анализа. В процессе анализа акватория пролегания маршрута разбивается на отдельные части, зависящие от расстояния до берегов и основных глубин. Открытые акватории делятся на кластеры большего размера. Вблизи берегов и на малых глубинах кластеризация является менее масштабной. Центроиды кластеров являются вершинами графов будущего маршрута. Это приводит к моделированию графов разного размера. Объединение графов вдоль маршрута формирует гиперграф. В качестве веса ребер графа использовалось расстояние. Для определения наивыгоднейшего маршрута по критерию скорости, стоимости или безопасности добавляются весовые коэффициенты, зависящие от погодных условий и других факторов. В результате такого подхода на гиперграфе появляется несколько маршрутов. В зависимости от веса приоритетного критерия автоматически выбирается маршрут. Предложенный метод может

быть в дальнейшем использован для создания систем автоматизированной прокладки оптимальных маршрутов с учетом выбранных критериев при изменяющихся условиях окружающей среды в процессе движения и его перестроения при необходимости.

Ключевые слова: безопасность судна, гидрометеорологические параметры, качка, морское волнение, ветер, морская поверхность, кластеризация.

Для цитирования:

Акмайкин Д. А. Моделирование маршрута судна с помощью кластерного анализа / Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, С. Ф. Ключева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-735-743.

Введение (Introduction)

При построении маршрута движения судна необходимо учитывать воздействие ветра, волн, течений и прочих факторов, оказывающих влияние на безопасность. Учет влияния гидрометеорологической обстановки на судно при построении маршрута перехода является одной из ключевых задач морского судовождения. Постоянное совершенствование средств мониторинга окружающей среды позволяет строить оптимальные маршруты с учетом гидрометеорологических параметров вокруг судна и вдоль предполагаемой траектории [1]. Обновление информации о погодных условиях осуществляется несколько раз в сутки. Поступающая информация является сложной для обработки классическими методами из-за больших объемов. В статье для оценки влияния окружающей среды вдоль предполагаемого маршрута предлагается использовать новый подход в построении графов поиска пути. Построение графов на навигационной карте осложнено отсутствием фиксированных трасс, а учет изменчивости окружающей среды всегда приводит к корректировке первичного маршрута.

В настоящее время оценка окружающей обстановки осуществляется на основе информации, получаемой от береговых служб, и с помощью визуальных наблюдений экипажем судна. На гидрометеорологических картах указываются области высокого и низкого давления, положения их центров и возможные траектории перемещения, проводятся линии раздела различных воздушных масс, зоны осадков, туманов и др. Анализируя полученную информацию при планировании маршрута, судоводитель имеет возможность предпринять меры по уклонению от опасных или нежелательных климатических условий [2]–[4]. Однако масштаб карт погоды и информация, представляемая в метеорологических сообщениях, позволяют выполнить только оценку обстановки и прогноз ее изменения, определить точные параметры гидрометеорологической обстановки в зоне навигации судна с их помощью невозможно, так как при составлении прогнозов не учитывается фактическая погода в районе нахождения судна.

Судоводителю необходимо осуществить всесторонний анализ полученной карты для составления прогноза погоды для собственного судна [4], а также выполнить визуальные наблюдения с мостика судна, на основе которых определяются основные характеристики атмосферы (направление и скорость ветра, видимость, облачность и др.) и состояние водной среды (степень волнения в баллах, параметры ледовой обстановки при наличии, течения и др.). Простых и удобных приборов, которые позволяют производить непосредственно на судне измерение указанных параметров, пока не существует [5]. Однако в штормовых условиях параметры волнения и ветра крайне важны, так как волнение моря ведет к рысканию, потере скорости и качке судна, забрызгиванию и заливанию палуб, понижению дальности обнаружения целей радиолокационными и гидроакустическими станциями. Деформация и напряжение, испытываемые корпусом судна при плавании на попутном или встречном волнении, иногда бывают столь значительны, что происходит разрушение конструкций, нередко приводящее к гибели судна. Волнение в мелководных районах опасно тем, что судно начинает бить килем о грунт.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методы построения оптимальных маршрутов морских судов В настоящее время существует большое количество средств дистанционного зондирования, позволяющих получить информацию

о состоянии атмосферы и гидросферы Земли практически в реальном времени. В рамках развития e-Navigation на судах возможно использование данных, получаемых такими средствами практически в реальном времени. Для измерения параметров приповерхностного ветра над морской поверхностью в настоящее время используются спутниковые радиометры (скаттерометры, радиовысотометры и радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны). Данные устройства позволяют измерять параметры ветра с пространственным разрешением 25 км, погрешностью определения скорости ветра ± 2 м/с или 10 % и направления $\pm 20^\circ$, высоту морского волнения с погрешностью $\pm 0,5$ м/с или 10 % и направления $\pm 10^\circ$. Спутниковые алгоритмы определения гидрометеорологических параметров не всегда имеют однозначную взаимосвязь с принятым сигналом, ветром и волнением. На принятый сигнал влияет ряд факторов, в том числе наличие водяного пара в атмосфере, облаков, дождя, поверхностной температуры и даже флуктуации параметров радиометра [6]–[8], но при этом они позволяют получить оперативную информацию о состоянии морской поверхности большой площади с пространственным разрешением, достаточным для точного прогнозирования маршрута перехода. Исследования, направленные на оптимизацию расходов на переход судна между портами, всегда вызывали интерес исследователей, занимающихся вопросами перевозки грузов морем. Развитие математических методов, коммуникационной техники и вычислительных возможностей компьютерного оборудования привело к развитию методов оптимального управления, к которым относится создание программ и алгоритмов нахождения оптимальных траекторий движения судов [9]–[11].

В настоящее время для автоматизированного поиска оптимального маршрута судна используются алгоритмы, основанные на теории графов и теории многокритериальной оптимизации [12]–[15]. Информация о районе плавания в графах маршрута имеет различное представление. При этом граф задается по точкам в пределах гарантированной полосы пропускания. Такой граф маршрута судна является ориентированным, т. е. представлен в виде направленной последовательности поворотных точек (вершин) и ребер графа (отрезки пути судна). Таким образом, исходная трасса морского пути в заданной акватории океана задана связным графом $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ — множество всех вершин графа, которые являются портами (пунктами) либо точками поворота; $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ — множество всех ребер графа. Каждому ребру поставлены в соответствие упорядоченная пара вершин $(v_i, v_j) \in E$ и вес ребра $w_{i,j}$ — вектор значений коэффициентов: протяженность пути между смежными вершинами S_{ij} , ходовое время t_{ij} , стоимость перехода ex_{ij} и безопасность мореплавания $P_{\text{без}}$. Задача заключается в формировании оптимального (наивыгоднейшего) маршрута судна, который является безопасным и минимальным по стоимости или времени перехода.

Кратчайший путь может оказаться не самым безопасным, и время перехода с учетом внешних факторов может быть не самым быстрым, но если параметры безопасности соответствуют рекомендациям, обеспечивают сохранность груза и судна и стоимость перехода удовлетворяет требованиям, то решение найдено. В противном случае следует исключить этот вариант из области допустимых решений и перейти к поиску маршрута, удовлетворяющего требованиям безопасности и стоимости (стоимость перехода, расходы топлива и другие затраты).

Методы и алгоритмы поиска минимального по стоимости и протяженности маршрута основаны на эвристических оценочных функциях. Формирование вектора эвристических оценок $Est(V)$ для графа $G(V, E)$ основано на сопоставлении вершин графа с некоторым целым числом с учетом перспективности раскрытия вершины и безопасности участка трассы до указанной вершины. Перспективность раскрытия вершины оценивается глубиной вложенности вершин графа от целевой вершины к начальной вершине по каждому из возможных направлений.

Кластеризация навигационной карты. Теория графов широко применяется для решения многих прикладных задач в различных областях исследований. При наличии большого количества исходных данных решить такую задачу становится невозможно, так как построение графа основано на миллионах точек. Примером такой задачи является программное формирование графа маршрутов судов в том или ином морском районе. Из-за вычислительных ресурсов компьютеров невозможно изучить все возможные варианты и найти решение. Поэтому при решении подобной

задачи нужен способ группировки точек и областей по наиболее важным для дальнейшей работы критериям. Краеугольным камнем таких решений является кластерный анализ. Его применение позволит проводить анализ районов плавания с учетом погрешностей, неточностей и погрешностей при оцифровке навигационных карт, а также появится возможность построения маршрута судна в автоматическом режиме [16], [17].

Качество кластеризации определяется метрикой, которая является мерой «похожести» объектов на основе их наиболее важных признаков. Навигация выполняет кластеризацию по ряду навигационных параметров. Одними из важных параметров являются глубина и расстояние между точками цифровой карты [18]. На основе проведенной кластеризации выполняется автоматизация формирования маршрутов для судов. Этот подход особенно актуален для реализации навигации в мелководных архипелажных районах вдоль береговой линии.

Общая постановка задачи. Район плавания показан на рис. 1, маршрут выполнен из порта Пусан ($35^{\circ} 06' 10''$ N, $129^{\circ} 02' 25''$ E) в порт Кусиро ($42^{\circ} 58' 30''$ N, $144^{\circ} 22' 28''$ E). Карты волнения и ветра в заданном районе приведены на рис. 2, вычисления выполнены для контрольных точек траектории.

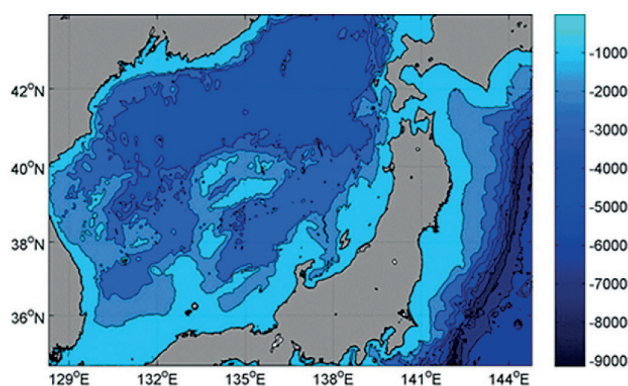


Рис. 1. Район плавания Пусан – Кусиро

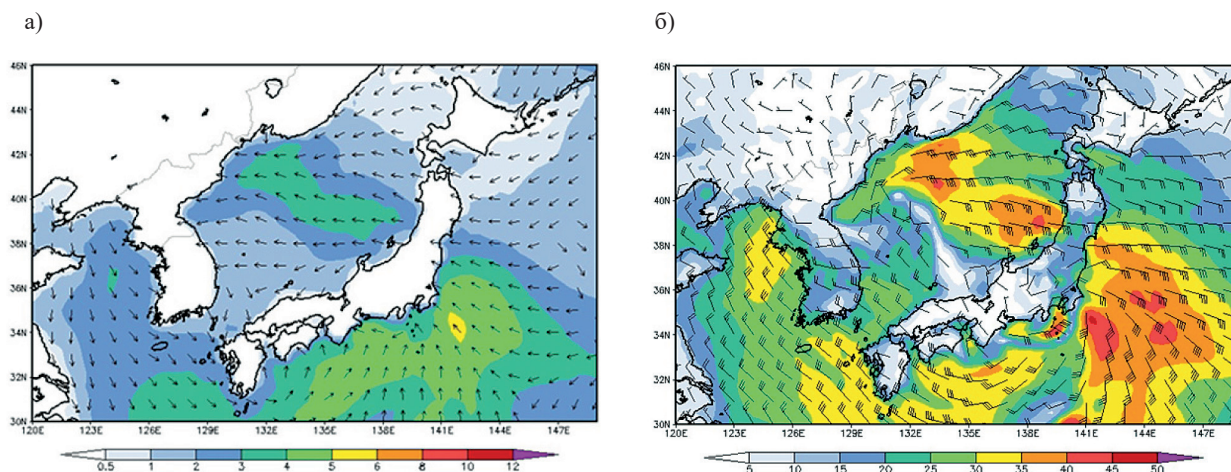


Рис. 2. Волнение (а) и ветер (б) в районе Пусан – Кусиро

Программное моделирование графов маршрутов судов основано на кластеризации исходной цифровой базы данных навигационных районов. Разработанный алгоритм реализован для упрощенной цифровой модели данных, включающей отметки глубин и их географические координаты, отмели и отметки высот.

Граф маршрута должен строиться по результатам кластеризации данных района плавания при заданных начальной и конечной точках маршрута судна и безопасном минимальном уровне глубины. Предлагается формировать вершины графа на основе кластеров глубин и строить ребра графа таким образом, чтобы избежать перекрытия возможных конфигураций с учетом курса корабля.

В такой постановке задача состоит из трех основных этапов:

первый этап — кластеризация объектов (точек) в исходной базе данных;

второй этап — формирование набора вершин графа на основе сформированных кластеров;

третий этап — формирование ребер графа на основе подмножества вершин графа [18].

Результаты (Results)

Программное моделирование выполнено на основе разработанной коллективом авторов данного исследования программы, позволяющей отображать результаты моделирования визуально. Программа выполнена в среде C++. При ее запуске раскрывается форма, приведенная на рис. 3.

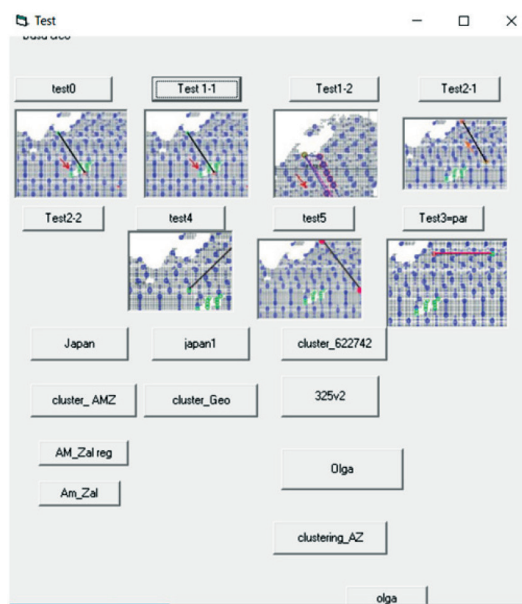


Рис. 3. Интерфейс программы

Построение маршрута движения происходит в несколько этапов. Вначале формируется маршрут судна в виде гиперграфа $G = G1 \cup G2$, состоящего из двух подграфов $G1$ и $G2$. Для того, чтобы начать построение графа, нужно задать начальную точку (исходную) и точку, куда следует судно. Затем программа анализирует расположение кластеров на цифровой карте и строит граф маршрута.

Гиперграф строится на основе проведенной кластеризации глубин (гибридный алгоритм кластеризации на базе метрики по расстоянию и значению глубин) заданного района плавания [18], [19], где вершинами графа являются центры кластеров, расположенные вокруг линии, соединяющей начальную и конечную точки на заданном расстоянии (рис. 4).



Рис. 4. Гиперграф маршрута судна на основе кластеризации глубин

При этом граф G1 построен на основе кластеров большого радиуса (45–100 миль) соответственно большим глубинам (более 2000 м). Граф G2 (прямоугольная область, соответствующая области Сангарского пролива) строится на базе кластеров меньшего радиуса (10 миль) с учетом сложной береговой черты в данной области. Ребра графа G2 формируются на основе центров кластеров Сангарского пролива, при этом начальной вершиной служит конечная вершина графа G1. Параметры кластеризации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры кластеризации по глубинам

Параметры	Граф G1	Граф G2
Число кластеров	36	99
Радиус кластеров, мили	45	10
Число точек	184325	16045
Коэффициенты кластеризации	$d_p = 0,55; d_h = 0,45$	$d_p = 0,45; d_h = 0,55$
Средний уровень глубин, м	1634	1010

Вычисления выполнены для типового судна-танкера водоизмещением 18904 т; дедвейт 14359 т; длина 120,07 м; ширина 21 м; высота борта 12,3 м; скорость максимальная 12,5 уз. Соответственно в грузу при осадке 9,5 м высота надводного борта 12,3 м, высота надстройки 30 м. Парусность судна рассчитывается по методике, предложенной в работе [20], с учетом коэффициента парусности судовой кормовой надстройки. В табл. 2 приведены результаты моделирования по намеченной траектории с учетом ветра и течения.

Таблица 2

Влияние ветра и волнения на судно

Параметры	Точки маршрута					
	1	2	3	4	5	6
Период встречи с волной	3,098	3,098	4,38	6,197	5,36	4,381
Период собственных колебаний	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38
Истинный ветер	7,1	21,7	21,74	15,2	21,64	21,57
Направление истинного ветра	138,81	139,8	149,2	175,37	163	266,91
Удельное давление ветра на судно	4,04	37,86	37,82	184,49	37,4	37,15
Кренящий момент	3,4	77,13	77,16	37,53	76,29	75,78

В результате обработки данных безопасная траектория движения из порта Пусан в порт Кусиро при указанных погодных условиях проходит через нижнюю часть графа пути судна. Проход через пролив имеет несколько решений и в процессе нахождения кратчайшего пути на графе позволяет построить оптимальный маршрут.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- определение гидрометеорологических параметров вокруг судна является одним из важнейших факторов безопасности мореплавания;
- для построения безопасного маршрута предлагается использовать теорию графов;
- для уменьшения объема вычислений при построении графов применен кластерный анализ, основными критериями которого являются глубина и расстояние до берега;

- на сформированном гиперграфе можно выстроить несколько маршрутов, для выбора оптимального используются такие критерии, как скорость, стоимость и безопасность;
- на основе кластерного моделирования и оценки гидрометеорологической обстановки в районе плавания судна можно осуществить автоматизированное формирование маршрута судна;
- показан принцип построения гиперграфа путей для поиска оптимального маршрута судна без учета дополнительных факторов, оказывающих влияние на безопасность мореплавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акмайкин Д. А. Основные принципы и этапы планирования маршрутов судов / Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, А. В. Гамс // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 1 (106). — С. 50–54.
2. Мезенцева Л. И. Практикум по гидрометеорологическому обеспечению судовождения. Ч. 2: Синоптическая метеорология для судоводителей: учеб. пособие / Л. И. Мезенцева, И. С. Карпушин. — Владивосток: Дальрыбвтуз, 2022. — 168 с.
3. Панов Б. Н. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения / Б. Н. Панов. — Керчь: Керченский гос. морской технологический ун-т, 2020. — 173 с.
4. Сухина М. И. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения / М. И. Сухина, Г. В. Белокур, А. В. Головкин. — М.: ИНФРА-М, 2022. — 283 с.
5. Гилёв Ю. С. Кораблевождение / Ю. С. Гилёв, С. А. Верещагин, Д. Н. Рубинштейн, В. Н. Пасешниченко. — Владивосток: ТОВМИ им. С. О. Макарова, 2009. — 456 с.
6. Chelton D. B. Scatterometer-Based Assessment of 10-m Wind Analyses from the Operational ECMWF and NCEP Numerical Weather Prediction Models / D. B. Chelton, M. H. Freilich // Monthly Weather Review. — 2005. — Vol.133. — Is. 2. — Pp. 409–429. DOI: 10.1175/MWR-2861.1.
7. Chelton D. B. On the Use of QuikSCAT Scatterometer Measurements of Surface Winds for Marine Weather Prediction / D. B. Chelton, M. H. Freilich, J. M. Sienkiewicz, J. M. Von Ahn // Monthly Weather Review. — 2006. — T. 134. — № 8. — Pp. 2055–2071. DOI: 10.1175/MWR3179.1
8. Risien C. M. A satellite-derived climatology of global ocean winds / C. M. Risien, D. B. Chelton // Remote Sensing of Environment. — 2006. — Vol. 105. — Is. 3. — Pp. 221–236. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.017.
9. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. — М.: Высшая школа, 1989. — 263 с.
10. Галеев Э. М. Оптимизация: теория, примеры, задачи / Э. М. Галеев, В. М. Тихомиров — М.: Эдиториал УРСС, 2000. — 320 с.
11. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука, 1971. — 424 с.
12. Акмайкин Д. А. Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 229–236. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-229-236.
13. Васьков А. С. Анализ и выбор методов автоматизированного поиска оптимального маршрута в навигационных комплексах / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Сб. науч. тр. НГМА. — 1997. — Т. 2. — С. 103–119.
14. Васьков В. А. Построение программной траектории маневрирования судна при швартовке / В. А. Васьков, А. А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 4 (58). — С. 25–29.
15. Akmaykin D. A. Solaris' information system for ship's navigation, using operational analysis of shipboard and satellite remote sensing data of hydrosphere and atmosphere / D. A. Akmaykin, D. B. Homenko, P. A. Salyuk, I. E. Stepochkin, K. A. Shmirko // Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space. — SPIE, 2014. — Vol. 9261. — Pp. 201–210. DOI: 10.1117/12.2069007.
16. Вагущенко Л. Л. Судовые навигационно-информационные системы / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2004. — 302 с.
17. Дерябин В. В. Планирование перехода в электронных картографических навигационных информационных системах (ЭКНИС): [Электронный ресурс] / В. В. Дерябин. — Электрон. граф. дан. (1,5 Гб). — СПб.: Научные технологии, 2022. — эл. опт. диск в картридже 1USB флеш-накопитель.

18. Акмайкин Д. А. Результаты исследований проблемы моделирования графа маршрута судна на основе алгоритмов кластеризации / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 29–38. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-29-38.

19. Кутузов В. М. Морская радиолокация: конспект лекций / В. М. Кутузов, А. А. Коновалов, В. Н. Михайлов. — СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — 145 с.

20. Дун С. Определение площади и плеча парусности судна-газовоза LNG / С. Дун // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2015. — № 4 (111). — С. 218–221.

REFERENCES

1. Akmaykin, D. A., V. V. Bocharova, and A. V. Gams. "Route planning." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(106) (2023): 50–54.
2. Mezentseva, L. I., and I. S. Karpushin. *Praktikum po gidrometeorologicheskemu obespecheniyu sudovozhdeniya. Chast' 2. Sinopticheskaya meteorologiya dlya sudovoditelei*. Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2022.
3. Panov, B. N. *Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya*. Kerch': Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet, 2020.
4. Sukhina, M. I., G. V. Belokur, and A. V. Golovko. *Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya*. M.: INFRA-M, 2022.
5. Gilev, Yu. S., S. A. Vereshchagin, D. N. Rubinshtein, and V. N. Paseshnichenko. *Korablevozhdenie*. Vladivostok: TOVMI im. S. O. Makarova, 2009.
6. Chelton, Dudley B., and Michael H. Freilich. "Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models." *Monthly Weather Review* 133.2 (2005): 409–429. DOI: 10.1175/MWR-2861.1
7. Chelton, Dudley B., Michael H. Freilich, Joseph M. Sienkiewicz, and Joan M. Von Ahn. "On the use of QuikSCAT scatterometer measurements of surface winds for marine weather prediction." *Monthly weather review* 134.8 (2006): 2055–2071. DOI: 10.1175/MWR3179.1
8. Risien, Craig M., and Dudley B. Chelton. "A satellite-derived climatology of global ocean winds." *Remote Sensing of Environment* 105.3 (2006): 221–236. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.017.
9. Aleksandrov, A. G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy*. M.: Vysshaya shkola, 1989.
10. Galeev, E. M., and V. M. Tikhomirov. *Optimizatsiya: teoriya, primery, zadachi*. M.: Editoriyal URSS, 2000.
11. Moiseev, N. N. *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem*. M.: Nauka, 1971.
12. Akmaikin, D. A., S. F. Klyueva, and P. A. Salyuk. "Proekt sistemy operativnogo analiza i optimizatsii dvizheniya morskikh sudov." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 229–236. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-229-236.
13. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. "Analiz i vybor metodov avtomatizirovannogo poiska optimal'nogo marshruta v navigatsionnykh kompleksakh." *Sb. nauchn. tr. NGMA 2* (1997): 103–119.
14. Vaskov, V. A., and A. A. Mironenko. "Designing of the program trajectory of the vessel maneuvering at mooring." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (58) (2009): 25–29.
15. Akmaykin, Denis A., Dmitriy B. Homenko, Pavel A. Salyuk, Igor E. Steepochkin, and Konstantin A. Shmirko. "Solaris' information system for ship's navigation, using operational analysis of shipboard and satellite remote sensing data of hydrosphere and atmosphere." *Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space*. Vol. 9261. SPIE, 2014. 201–210. DOI: 10.1117/12.2069007.
16. Vagushchenko, L. L. *Sudovye navigatsionno-informatsionnye sistemy*. Odessa: Feniks, 2004.
17. Deryabin, V. V. *Planirovanie perekhoda v elektronnykh kartograficheskikh navigatsionnykh informatsionnykh sistemakh (EKNIS)*. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2022.
18. Akmaikin, D. A., S. F. Klyueva, and P. A. Salyuk. "Rezultaty issledovaniy problemy modelirovaniya grafa marshruta sudna na osnove algoritmov klasterizatsii." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 29–38. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-29-38.
19. Kutuzov, V. M., A. A. Kononov, and V. N. Mikhailov. *Morskaya radiolokatsiya: konspekt lektsii*. SPb: SPbGETU "LETI", 2016.
20. Dun, S. "Opredelenie ploshchadi i plecha parusnosti sudna-gazovoza LNG." *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva* 4(111) (2015): 218–221.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайкин Денис Александрович —

кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: akmaykin@msun.ru

Бочарова Виктория Валерьевна —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: Bocharova@msun.ru

Клюева Светлана Федоровна —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: klsvetlkl@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin, Denis A. —

PhD, associate professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: akmaykin@msun.ru

Bocharova, Victoria V. —

PhD
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Bocharova@msun.ru

Klyueva, Svetlana F. —

PhD
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: klsvetlkl@gmail.com

Статья поступила в редакцию 4 мая 2023 г.

Received: May 4, 2023.

THE TASKS FOR BATHYMETRIC INVESTIGATIONS AND CARTOGRAPHIC SUPPORT OF THE NORTHERN SEA HIGH LATITUDE ROUTES IN THE EAST SIBERIAN SEA

Yu. G. Firsov, D. A. Pozenkova

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

The current state and issues of bathymetric investigations of the East Siberian Sea are examined in this study. The main sources of bathymetric data are characterized. The possibilities to solve these issues in order to improve the efficiency of the oncoming bathymetric investigation in the East Siberian Sea for supporting the urgent practical tasks of the Russian Federation concerning the Northern Sea high latitude routes are discussed. The importance of a new hydrographic investigation through the high latitude routes in the East Siberian Sea in order to provide the possibility of year-round navigation of the large-tonnage Arc7-class icebreaking LNG carriers is especially emphasized. Compiling of the new coastal electronic navigation charts for the new Northern Sea high latitude routes is stated as one of the main priorities. The lack of coastal electronic navigation charts of the high latitude routes in the East Siberian Sea will present a challenge for the establishing of year-round navigation for high ice-capable Arc7-class LNG carriers during the coming several years. The drafting of high latitude routes must also consider the seafloor gas venting in the East Siberian Sea. The satellite remote sensing data from passive microwave radiometers and optical sensors using «modis & amsr2» technology provided by the University of Bremen ensures the complementary observations of sea ice concentration in the eastern part of the East Siberian Sea. The re-analysis of data from microwave radiometers AMSR-2 beginning from 2018 provides the conclusion about the autumn degradation of the Aion ice massif. The analysis of the sea-ice concentration of the Aion ice massif during autumn–winter of 2022, the most severe in the last 5 years, allows us to give a recommendation concerning the new high latitude route in the East Siberian Sea. This route passes along the northern coast of Vrangeli island into the Chukchi Sea and it is more efficient for large-tonnage Arc7-class icebreaking LNG carriers ensuring year-round navigation in the East Siberian Sea. It is stated that hydrographic investigations carried out on the sections of the Northern Sea Route must adhere to the requirements of the International Hydrographic Organization. The urgency of developing the state integrated bathymetric database for the Arctic Ocean including the Arctic Seas data along with the necessity of providing all Russian bathymetric data acquired in the Arctic region to the assigned national centre is discussed. The FKU 280 ZKP VMF is proposed as such national centre. The importance of coastal electronic navigation charts for the high latitude routes in the East Siberian Sea created on the basis of modern technology is emphasized.

Keywords: Arctic region, Arctic Ocean, East Siberian Sea, arctic shelf, Arctic Basin, Northern Sea Route, bottom relief, mapping, hydrographic investigations, coastal electronic navigation charts, seafloor gas venting, Aion ice massif.

For citation:

Firsov, Yuri 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.

УДК 551.462.33(268)

ЗАДАЧИ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ТРАСС СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

Ю. Г. Фирсов, Д. А. Позенкова

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

Рассмотрены современное состояние и проблемы батиметрических исследований в Восточно-Сибирском море. Показаны основные источники батиметрических данных. Рассмотрены пути решения имеющихся проблем в целях повышения эффективности дальнейшего батиметрического изучения Восточно-Сибирского моря для обеспечения реализации научных и практических задач в Арктическом регионе. Рассмотрена возможность гидрографических исследований на новых высокоширотных трассах в Восточно-Сибирском море для обеспечения круглогодичной навигации СПГ-танкеров ледового класса («Arc7»). В качестве основных проблем отмечается недостаточное картографическое обеспечение высокоширотных трасс, необходимых для проведения безопасной навигации СПГ-танкеров в Восточно-Сибирском море. Сформулирован вывод о том, что отсутствие путевых электронных навигационных карт в Восточно-Сибирском море, созданных на основе использования современных гидрографических технологий, может в ближайшие годы препятствовать осуществлению круглогодичной навигации СПГ-танкеров. Подчеркивается, что при проектировании новых высокоширотных трасс необходимо учитывать текущую ледовую обстановку для безопасного плавания в летне-осенний и зимний периоды, а также наличие донного газопроявления в Восточно-Сибирском море. Рассмотрен космический мониторинг Северного Ледовитого океана, представленный технологиями «Modis & Amsr2» университета Бремена. По реанализу данных микроволнового радиометра AMSR-2 сплоченности льдов в Восточно-Сибирском море, начиная с 2018 г. сделан вывод об осеннем разрежении Айонского ледового массива. Проанализировано состояние многолетних льдов Айонского ледового массива в 2022 г. как наиболее сложного в ледовом отношении за последние годы, и дана рекомендация по проектированию новой высокоширотной трассы, проходящей в Чукотское море к северу от острова Врангеля. Отмечается, что гидрографические съемки на трассе Северного морского пути должны выполняться в соответствии с требованиями стандартов Международной гидрографической организации. Отмечается отсутствие российского стандарта на гидрографические съемки и необходимость его разработки, согласования и утверждения. Обоснована необходимость формирования современной единой государственной базы батиметрических данных по Северному Ледовитому океану, включая арктические моря России, предоставления всех данных по рельефу дна, получаемых различными российскими организациями, выполняющими морские исследования, в единый национальный центр, в качестве которого может выступить ФКУ 280 ЦКП ВМФ РФ. Обращается внимание на то, что путевые электронные навигационные карты Восточно-Сибирского моря создаются на основе современных гидрографических технологий изучения морского дна северных морей России.

Ключевые слова: Северный морской путь, СПГ-танкер, Восточно-Сибирское море, рельеф морского дна, Айонский ледовый массив, гидрографические исследования, донное газопроявление, картографирование морского дна, электронные навигационные карты.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Последнее десятилетие ознаменовано проявлением повышенного внимания к Северному морскому пути (СМП), пролегающему по окраинным морям Северного Ледовитого океана (СЛО). Перерыв в изучении рельефа дна СЛО после событий 1991 г. продолжался в течение почти 20 лет. В 2010 г. в связи с необходимостью получения данных для дополнительного обоснования расширенного континентального шельфа России началось проведение батиметрической съемки в Центральном Арктическом бассейне. Гидрографические работы в окраинных морях по трассе Северного морского пути (СМП) были продолжены с 2011 г. и выполнялись главным образом в западном секторе Арктики. Отличительной особенностью съемки рельефа дна в СЛО явилось использование новых гидрографических технологий на основе применения многолучевых эхолотов (МЛЭ), многосистемных двухчастотных фазовых приемников глобальных навигационных спутниковых (ГНСС), а также специализированного гидрографического программного обеспечения, способного по-новому организовать процесс акустического исследования морского дна.

Первоначально гидрографические работы по трассе СМП, выполняемые в Карском море, имели целью обеспечение круглогодичной навигации для транспортировки сырья из верховьев Енисея (Норильский промышленный район), а позже также и сжиженного природного газа (СПГ) из порта

Сабетта. Изучению транспортных потоков в западном, а позже и в восточном секторе Арктики, а также их навигационно-гидрографическому обеспечению посвящены многочисленные исследования. Вопросы развития трасс СМП рассмотрены в работах [1]–[5]. Гидрографическая изученность СМП отражена в работах [6]–[9]. Различные способы оценки проходных глубин рассмотрены в работах [10]–[13]. Влияние состояния льда на плавание по СМП и проведение гидрографических работ исследовано в работах [14], [15]. В течение последних пяти лет вызывают интерес исследования маршрутов плавания крупнотоннажных судов в восточном секторе Арктики, изложенные в работах [16], [17].

Целью данного исследования является анализ и оценка текущего состояния гидрографических работ в Восточно-Сибирском море, а также картографического обеспечения высокоширотных трасс СМП для осуществления круглогодичной безопасной навигации СПК-танкеров в Восточно-Сибирском море. При выполнении анализа использованы современные публикации по предмету исследований, ресурсы Интернет, электронные карты с применением ГИС-технологий и ЭКНИС dKartNavigator.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В связи с экономической целесообразностью использования крупнотоннажных судов для транспортировки СПГ и началом массового строительства специализированных СПК-танкеров, а также изменением политической ситуации в мире актуальным маршрутом для СМП после 2014 г. являются восточные арктические моря и особенно Восточно-Сибирское море. С 2016 г. ФГУП Гидрографическое предприятие (далее — ГП) Министерства транспорта РФ приступило к выполнению современных гидрографических работ по традиционной трассе СМП в море Лаптевых и затем по новой высокоширотной трассе в Восточно-Сибирском море к северу от островов Анжу. Необходимость гидрографических исследований этой высокоширотной трассы была вызвана тем, что новые СПГ-танкеры, имеющие осадку 13 м, не могли следовать по традиционной трассе СМП через пролив Санникова с лимитирующими глубинами 14 м. Фрагмент НМК (Адмиралтейский номер 11125) пролива Санникова, демонстрирующий лимитирующие глубины 14,8 м, приведен на рис. 1.

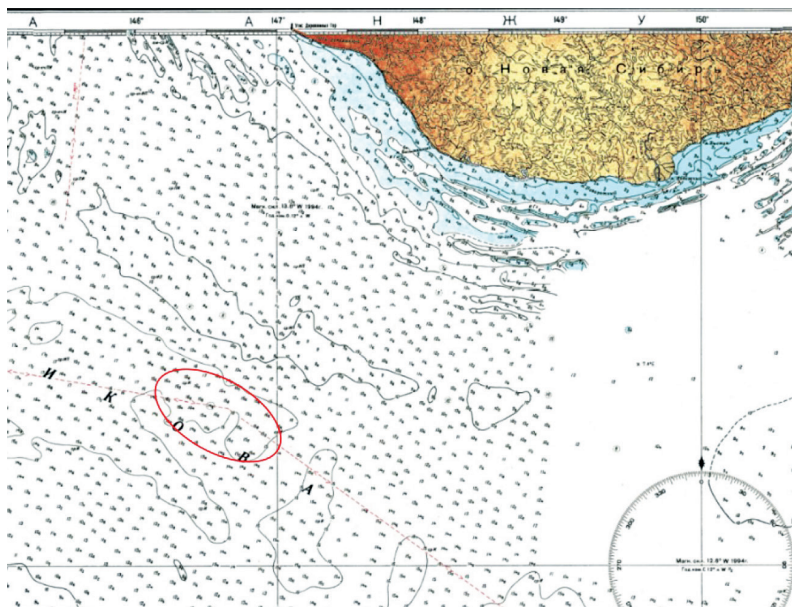


Рис. 1. Фрагмент НМК пролива Санникова с лимитирующими глубинами 14 м

Район с лимитирующими глубинами на рис. 1 обозначен красным овалом. Следует отметить, что в публикации [18] ошибочно утверждается, что в проливе Санникова «...глубина на фарватере составляет 24 м...». Вопросы гидрографической изученности пролива Санникова детально обсуждаются в работе [15].

Новосибирская часть Великой сибирской пустыни [19] к северу от островов Анжу позволяет выполнять гидрографические работы по чистой воде в летние месяцы. После 2016 г. работы были продолжены непосредственно в западной части Восточно-Сибирского моря и по высокоширотной трассе от пролива между островами Жохова и Вилькицкого в направлении острова Айон. Обзорная карта западной части Восточно-Сибирского моря с островами Анжу, входящими в состав островов Новосибирского архипелага, включая острова Жохова и Велькицкого, приведена на рис. 2.

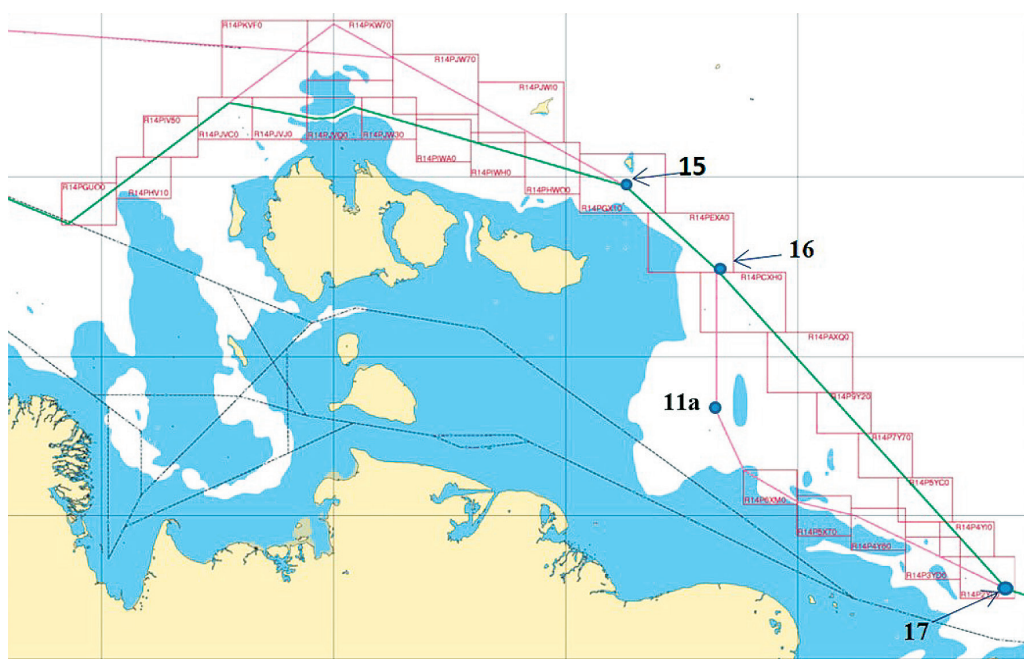


Рис. 2. Карта архипелага Новосибирских островов, включая острова Жохова и Велькицкого

В результате гидрографических исследований высокоширотной трассы в западной части Восточно-Сибирского моря в ГП были созданы цифровые справочно-информационные наборы, при этом переизданные НМК, официальные путевые электронные навигационные карты (ЭНК) по высокоширотной трассе до сих пор практически отсутствуют. Первоначально Министерство транспорта (Федеральное агентство морского и речного флота) и ГП планировали организовать структуру по подготовке ЭНК трассы СМП. Однако после перехода ГП в корпорацию «РосАТОМ» эти планы претерпели изменения. В результате создание НМК и ЭНК восточного сектора Арктики было поручено Министерству обороны в лице Управления навигации и океанографии (далее — УНиО) и ФКУ 280 — Центральное картографическое производство ВМФ (далее — 280 ЦКП).

Изучение рельефа дна северных морей СССР в послевоенные годы проводилось силами Гидрографического предприятия ММФ и было направлено главным образом на обеспечение безопасности мореплавания в первую очередь по трассам СМП. В 1950–70-е гг. для позиционирования гидрографических работ применялись отечественные фазовые радионавигационные системы (РНС) и однолучевые эхолоты (ОЛЭ). Позже, в 1980-е гг., на специализированных гидрографических судах ГП использовались зарубежные РНС и ОЛЭ типа Atlas DESO-20. Первоочередные работы в 1950-е гг. проводились в южной части арктических морей, вдоль всех побережий. Итогом первого этапа этих работ явилось создание комплекта навигационных морских карт (НМК) различного масштаба, обеспечивших навигационную безопасность плавания по трассе СМП для судов с осадкой 6–10 м. В настоящее время комплект навигационных морских карт (НМК) трассы СМП, изданных УНиО МО РФ, включает более 680 единиц, из них на Карское море приходится более 440 НМК.

В связи с появлением крупнотоннажных судов ледового класса для перевозки сжиженного газа (СПГ-танкеры), которые имеют осадку 13 м и поэтому не могут следовать через пролив Санникова, возникла необходимость проведения гидрографических работ на высокоширотных трассах в Восточно-Сибирском море. Дополнительным обстоятельством в пользу этого является изменение ледовых условий плавания в Восточно-Сибирском море в связи с потеплением климата. Начиная с 2011 г. ГП возобновило гидрографические исследования на существующей трассе СМП, включая высокоширотную трассу в Восточно-Сибирском море. Подготовлены цифровые справочно-информационные наборы (ЦСИН), границы рамок которых по состоянию на 2021 г. представлены на интернет-сайте ГП корпорации РосАтом¹. Общая коллекция ЦСИН трассы СМП на февраль 2021 г. составила 253 единицы. Положение рамок ЦСИН масштаба 1 : 45000 с их номерами в западной части Восточно-Сибирского моря на высокоширотной трассе СМП представлено на рис. 3. Однако ЦСИН не являются официальными ЭНК, которые прошли проверку в региональном центре МГО и включены в Каталог ЭНК МГО² и Каталог ЭНК УНиО МО РФ [20].



748

² ИНО Online Catalogues. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iho.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=06d967702c7f4094bbcb5b4f8e485b712&mobileBreakPoint=300>.

выполненных ГП до 2020 г. Начиная с 2020 г. ГП выполняется площадная съемка альтернативной высокоширотной трассы на юг от точки 16 и далее до соединения с точкой 17 (см. рис. 3). В полосе съемки 2020 г. (от точки 16 до точки 11а), которая выполнялась по чистой воде, была обнаружена минимальная глубина 21 м, а средние глубины составили 24–26 м. В 280 ЦКП отсутствуют материалы гидрографических исследований, выполненных ГП в западной части Восточно-Сибирского моря к северу и востоку от островов Анжу в период 2016–2020 гг. Не переданы в 280 ЦКП также ЦСИН, положения рамок которых показаны на рис. 3.

В процессе выполнения площадной съемки на высокоширотных трассах в ГП используются зарубежные многолучевые эхолоты и применяются современные гидрографические информационные технологии, однако нормы и правила съемки продолжают базироваться на устаревших нормативных документах, в частности ПГС-4 [22]. Эти нормы и правила не позволяют в полной мере использовать преимущества современных гидрографических технологий, требования к которым основаны на Стандартах на гидрографическую съемку Международной гидрографической организации (МГО) S-44, а также уступают этим требованиям в части точности съемки.

Результаты (Results)

Высокоширотная трасса СМП в Восточно-Сибирском море, полученная в результате многолучевой съемки ГП, выполненной в 2011–2019 гг., проходит по НМК с Адмиралтейскими номерами 11147, 11155, 11148 и 11149. Схемы гидрографической изученности с рамками НМК масштаба 1 : 500000 [20] и приблизительное положение линии высокоширотной трассы ГП между точками 15–17 показаны на рис. 4.

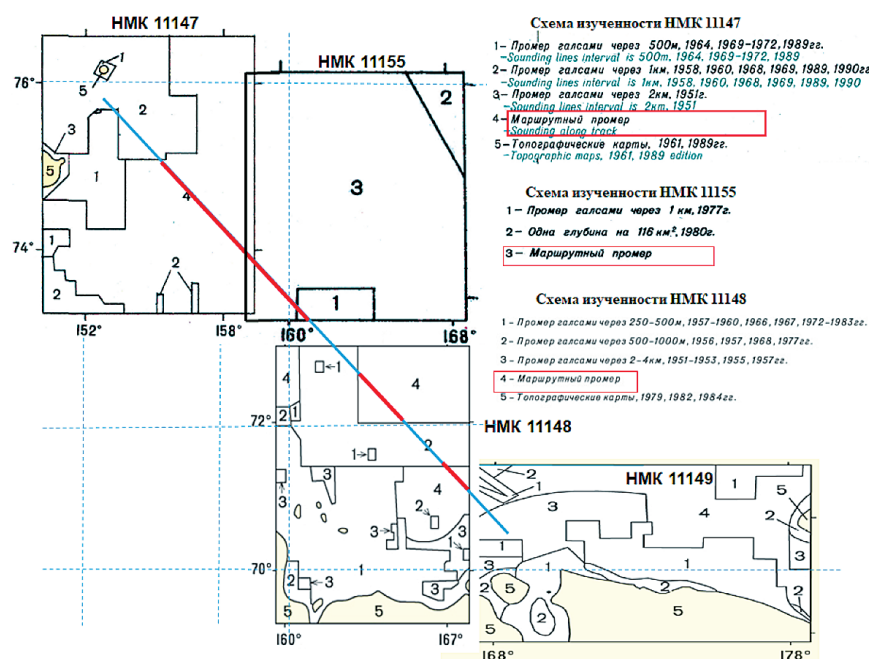


Рис. 4. Схемы гидрографической изученности на НМК 11147, 11155, 11148 и 11149

Анализ гидрографической изученности, представленной на НМК 11147 (изд. 1996 г.), 11155 (изд. 1993 г.) и 11148 (изд. 1994 г.), показал, что существенная часть высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море (отмечена на рис. 3 красными линиями) от точки 15 проходит по районам с недопустимо низкой гидрографической изученностью, полученной по результатам маршрутного промера. Сведения по такому промеру на схемах изученности не приводятся (см. номера зон 3 и 4 на рис. 4). На НМК 11155 основную площадь занимает «белое пятно» с несколькими галсами маршрутного промера. Поэтому использование для навигации СПК-танкеров в Восточно-Сибирском

личительные глубины и линии рекомендованных трасс СМП в Восточно-Сибирском море. Высокоширотная трасса от точки 15 (остров Жохова) к точке 16 и батиметрические объекты, извлеченные из этих ЭНК, изданных в 2016 г., отмечены на рис. 7 двойной красной пунктирной линией.

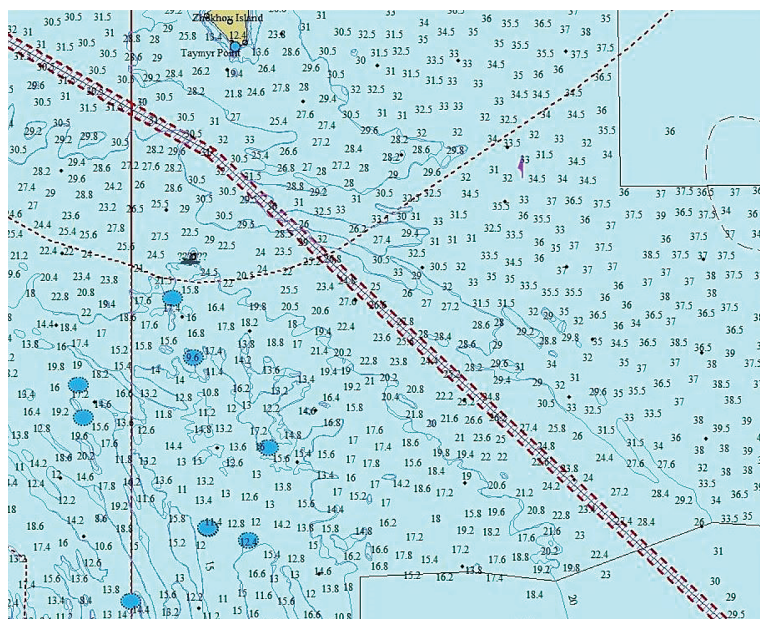


Рис. 7. Высокоширотная трасса на ЭНК RU2POX60 и RU20PXR0
масштаба 1 : 700 000 в западной части Восточно-Сибирского моря в ГИС Global Mapper

Фрагмент экрана ЭКНИС dKart Navigator с загруженной ЭНК RU2POX60 (1 : 700 000) показан на рис. 8. В ЭКНИС dKart Navigator ЭНК масштаба 1 : 700 000 положение высокоширотной трассы ГП от точки 15 может отображаться в диапазоне масштабов от 1 : 1000 до 1 : 1 000 000. На рис. 8 масштаб изображения ЭНК составляет 1: 500 000 и может быть увеличен для до 1 : 1000 для контроля следования по полосе шириной 2 км. Высокоширотная трасса в западной части Восточно-Сибирского моря, приведенная на рис. 5–8, является мелководной с глубинами 25–28 м и небезопасной ввиду возможного наличия донного газопоявления.

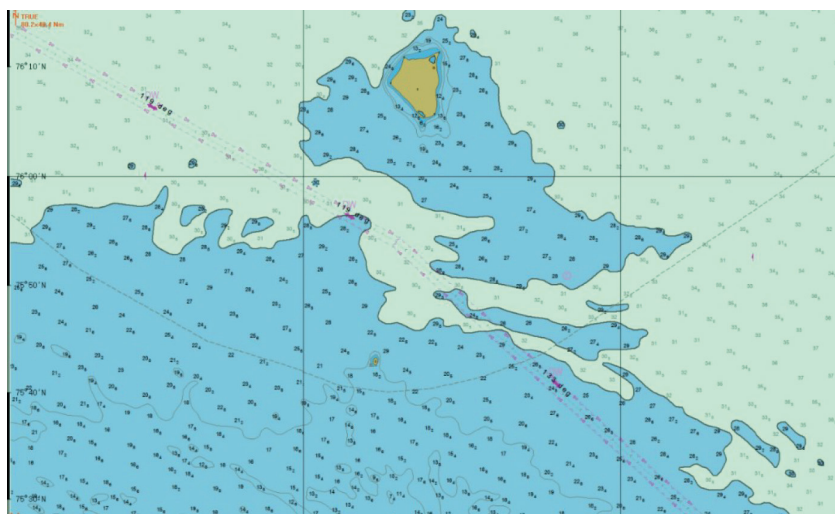


Рис. 8. Фрагмент экрана ЭКНИС dKartNavigator с ЭНК 1 : 700 000 (ЭНК RU2POX60)
в западной части Восточно-Сибирского моря

Для эффективной круглогодичной навигации СПГ-танкеров типа Yamalmax в ближайшие годы необходимо продолжить выполнение гидрографических работ по другим высокоширотным трассам СМП

в Восточно-Сибирском море, а также издание официальных путевых ЭНК РФ. Вопросы выбора оптимального положения этих высокоширотных трасс требуют дополнительного изучения и обоснования. Выполнение гидрографических работ в центральной части моря ранее усложнялось наличием практически круглогодичного ледового покрытия — Айонского ледового массива (АЛМ), состояние которого проанализировано в работах [23]–[27], в которых приведены статистические сведения, полученные с начала XXI в. при недостаточном привлечении данных космического зондирования. Исключением является монография [27], содержащая полезные сведения относительно текущего состояния АЛМ, сплоченность которого в осеннее время за последние 5–7 лет существенно сократилась. Это подтверждается также данными космического зондирования, которые находятся в свободном доступе в сети Интернет. Учитывая продолжающееся потепление Арктики, можно проводить гидрографическое обследование новых высокоширотных трасс в центральной и восточной частях Восточно-Сибирского моря.

Высокоширотная трасса шириной 2 км, обследованная ГП, не является единственно оптимальной для круглогодичной навигации СПГ-танкеров типа Yamalmax. Зимние переходы СПГ-танкеров по более северным высокоширотным трассам восточнее островов Анжу и далее в направлении севернее острова Врангеля начались еще в 2019–2020 гг. [28]. Следует изучить вопрос создания новой более северной трассы в восточной части моря, проходящей по большим глубинам, и, возможно, в более сложных ледовых условиях, которые не являются непреодолимыми для современных СПГ-танкеров.

Новую высокоширотную трассу рекомендуется начать от точки 15 (см. рис. 3) в направлении к острову Врангеля, обходя его с севера или запада с возможностью следования через пролив Лонга в зависимости от ледовой обстановки в восточной части Восточно-Сибирского моря. Информация о распределении и толщине льда на высокоширотной трассе в Восточно-Сибирском море в осенне-зимний период имеет решающее значение при проектировании новой высокоширотной трассы, безопасной в гидрографическом отношении для навигации СПГ-танкеров типа Yamalmax.

В январе 2021 г. ООО «ГК СКАНЭКС» приняла участие в информационном обеспечении СПГ-танкера «Кристоф де Марджери» ГК «Совкомфлот» при выполнении им транзитного перехода по трассе СМП в период зимней ледовой навигации. Отличительной особенностью этого перехода являлось отсутствие ледокольного сопровождения на всем пути следования. Высокоширотная трасса, использованная в период зимней навигации, представлена на изображении, выложенном на морском портале Scanex Maritime¹. Программное обеспечение, собранное в рамках платформы Scanex Maritime, предлагает пользователям сервисы мониторинга движения судов и условий ледовой обстановки в замерзающих морях.

В части новых источников данных для мониторинга ледовой обстановки подключены карты реанализа спутниковых данных CryoSat-2 для мониторинга толщины ледового покрова, внедрены результаты прогноза толщины льда по материалам модели ESRL NOAA на десять суток вперед. Дополнительно стали доступны новые детальные карты сплоченности морского льда, построенные по реанализу данных микроволнового радиометра AMSR-2 совместно с данными Terra/Aqua MODIS.

Начиная с 2019 г. информация по сплоченности льда и его толщине в СЛЮ доступна на сайте университета Бремена². Подробная информация о распределении многолетних и однолетних льдов, а также молодых льдов в осенне-зимний период доступна на одной из страниц сайта университета Бремена³ (1 km resolution sea ice concentration from modis & amsr2). Там же представлена и другая полезная информация по ледовитости СЛЮ, полученная с применением спутниковых технологий (MODIS-Aqua, AMSR2-GCOM_W1). В частности, приводятся графики ежемесячного распределения льда (в км²) с 1979 г. по 2022 г. с интервалами 8–12 лет. При этом отмечена минимальная ледовитость СЛЮ, полученная в 2021 г. Модели сплоченности *многолетних* льдов в СЛЮ в 2022 г., по данным сайта университета Бремена, полученные с использованием технологии Modis & Amr2, представлены на рис. 9.

¹ Группа компаний «СКАНЭКС». Морской портал. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.scanex.ru/cloud/maritime>.

² Sea Ice Remote Sensing at the University of Bremen <https://seaice.uni-bremen.de/start>.

³ Sea-ice concentration maps. 1 km resolution sea ice concentration from modis & amsr2. <https://seaice.uni-bremen.de/sea-ice-concentration/modis-amsr2>.

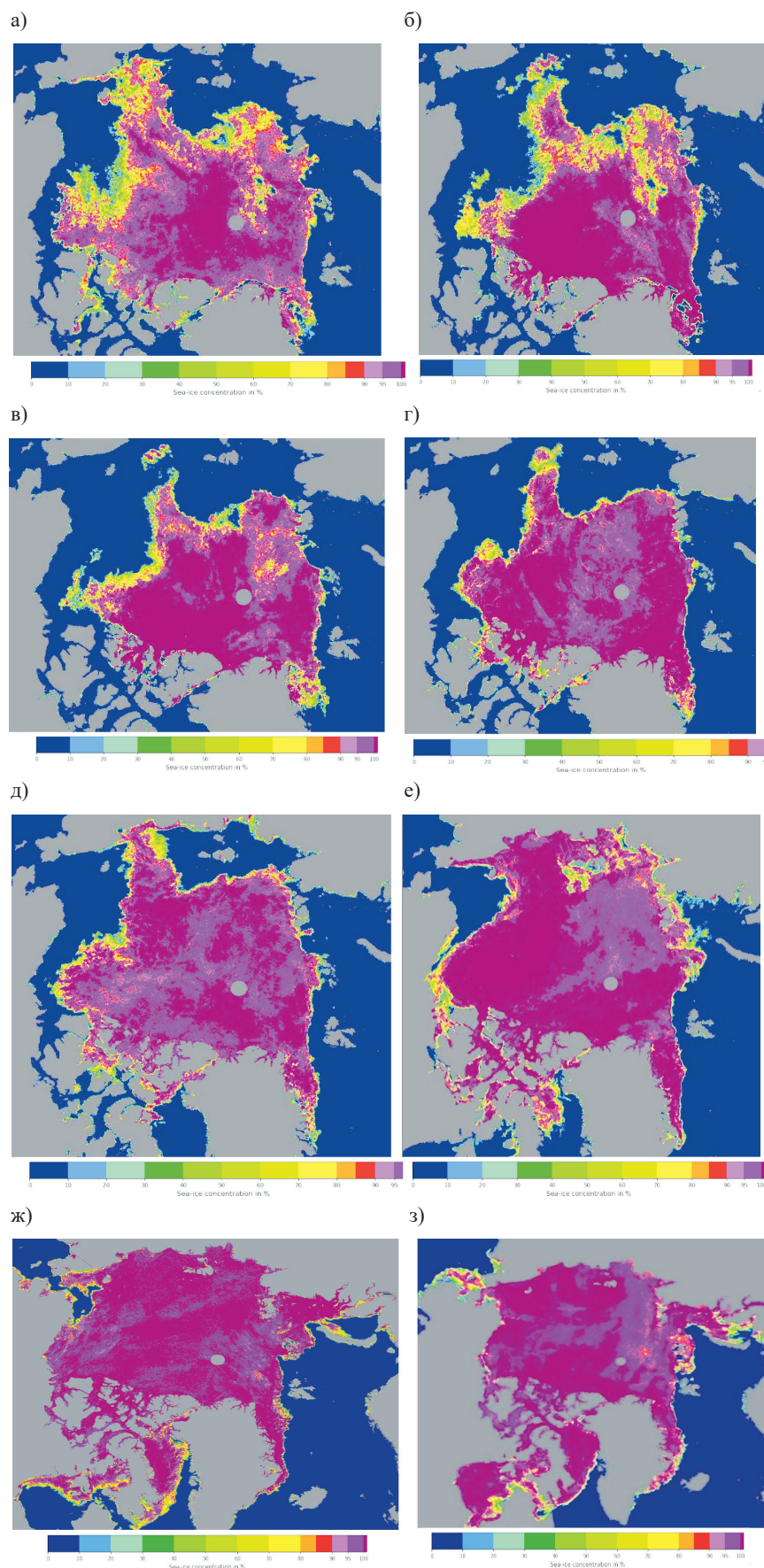


Рис. 9. Сплоченность многолетних льдов: а — на 15 августа 2022 г.; б — на 1 сентября 2022 г.; в — на 15 сентября 2022 г.; г — на 01 октября 2022 г.; д — на 15 октября 2022 г.; е — на 01 ноября 2022 г.; ж — на 01 декабря 2022 г.; з — на 01 января 2023 г.

Сведения, представленные на рис. 9, а, б и рис. 10, позволяют утверждать, что в августе только западная часть Восточно-Сибирского моря свободна ото льдов и доступна для проведения гидрографических работ. К началу сентября в АЛМ образуются разводья, позволяющие продлить съемки в восточном направлении. С начала сентября АЛМ начинает разрушаться и период с 1 по 15–20 сентября предположительно является наиболее благоприятным для выполнения работ по новой высокоширотной трассе (см. рис. 9, в, г). Такая ситуация наблюдается в течение последних 5–7 лет. После 1 октября происходит интенсивное наращивание АЛМ, что наглядно продемонстрировано на ледовых картах, представленных на рис. 9, д, е. После 15 октября проведение гидрографических работ по новой высокоширотной трассе в Восточно-Сибирском море возможно только к северу от острова Врангеля и предпочтительно с использованием гидрографических судов ледового класса. К концу октября южный край АЛМ составляет молодой лед толщиной 30–40 см, в западной части моря только начинается ледостав и толщина льдов не должна превышать 20 см. С конца октября начинается интенсивное ледообразование в юго-западной части Чукотского моря и уже к началу декабря лед покрывает практически все море, кроме его самой восточной части. На рис. 9, е показана ледовая обстановка в СЛО в ноябре. Проведение гидрографических работ в этот период в отдельные годы возможно только под проводкой ледокола и нецелесообразно. В ноябре плавание по традиционной трассе СМП вдоль сибирского берега проходит в ледовых условиях, а в районах к северу и востоку от острова Врангеля все еще чистая вода. В начале декабря Чукотское море покрывается молодым льдом, но в восточной его части все еще может оставаться чистая вода. Информация по толщине льда в СЛО в период с октября по апрель, начиная с 2010 г., публикуется на сайте университета Бремена¹. Расчет толщины льда выполнен на основе модели SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)². На рис. 10 приведены модельные данные толщины льда в СЛО в октябре – декабре 2022 г., полученные на сайте университета Бремена.

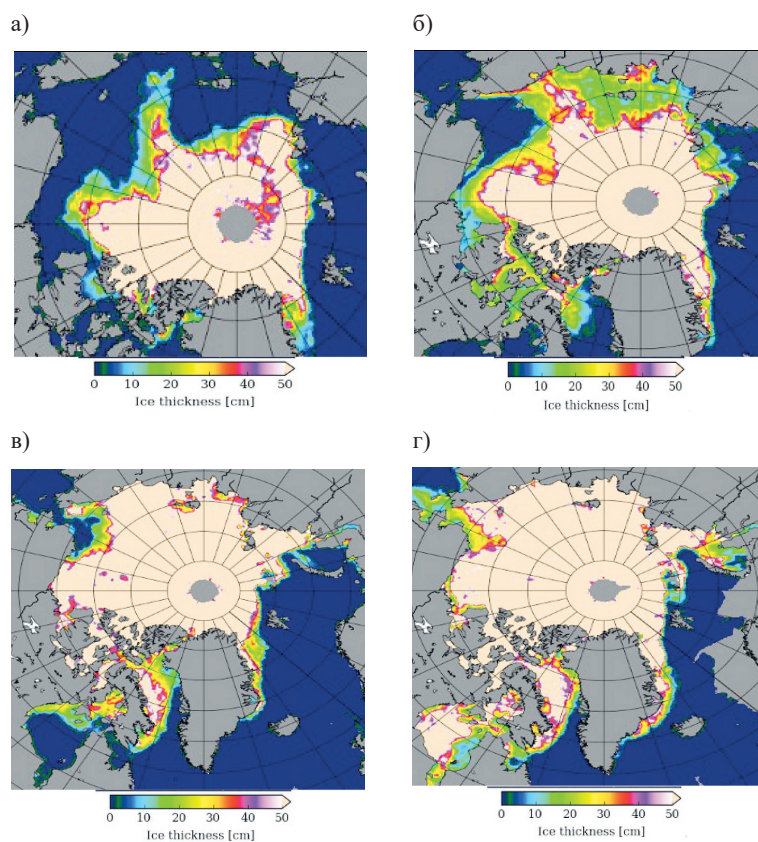


Рис. 10. Модельные данные толщины льда: а — 01 октября 2022 г.; б — на 01 ноября 2022 г.; в — 01 декабря 2022 г.; г — на 01 января 2023 г.

¹ SMOS Sea Ice Thickness ReadMe-first Technical Note (RM-TN). <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-L3-Sea-Ice-Thickness-Read-Me-First-Tech-Note.pdf>.

² SMOS Sea Ice Thickness. <https://spaces.awi.de/display/CS2SMOS/SMOS+Sea+Ice+Thickness>.

Приведенные сведения дополняют картину сплоченности льда в Восточно-Сибирском море и характеризуют возможность проектирования гидрографической съемки по новой высокоширотной трассе в восточной части моря. Имеющиеся сведения по состоянию Айонского ледового массива свидетельствуют о возможности проведения гидрографических работ в восточной части моря в осенний период с начала сентября и как минимум до 10–15 октября и согласуются с данными, приведенными в работе [29].

Анализ моделей сплоченности льдов Восточно-Сибирского моря в летне-осенний период, представленный на рис. 9, а — 10, в, показывает, что созданная ГП высокоширотная трасса (от точки 15 до точки 17 см. рис. 5) с 15 июля по 15 октября может быть свободна ото льда. Эта высокоширотная трасса будет сопряжена с новой трассой СМП вдоль сибирского берега, предназначенной для плавания крупнотоннажных судов с осадкой 15 м, обследованной современной площадной съемкой ГП в 2021 г. (см. рис. 5). В 2023 г. была продолжена площадная съемка новой трассы СМП вдоль сибирского берега между точками 17 и 20 с целью ее расширения (см. рис. 5).

В связи с ранее изложенным открывается возможность более полного гидрографического изучения Восточно-Сибирского моря, включая районы его центральной и восточной части, ранее практически недоступные ввиду наличия АЛМ. Приведенные спутниковые данные позволили прогнозировать изменения обстановки по ледовитости в АЛМ и наметить новую высокоширотную трассу. Предлагается от точки 15 (см. рис. 3) с координатами $75^{\circ}54'$ с. ш. и $152^{\circ}35'$ в. д. наметить трассу в точку N1 с координатами: 74° с. ш. и 165° в. д., далее в точку N2 с координатами: 74° с. ш. и 173° в. д. и затем в направлении острова Врангеля, обходя его с севера по изобате 40–50 м (координаты: точки N3: $71^{\circ}50'$ с. ш. и $175^{\circ}25'$ з. д.). Положение этой новой предлагаемой высокоширотной трассы приведено на рис. 11.

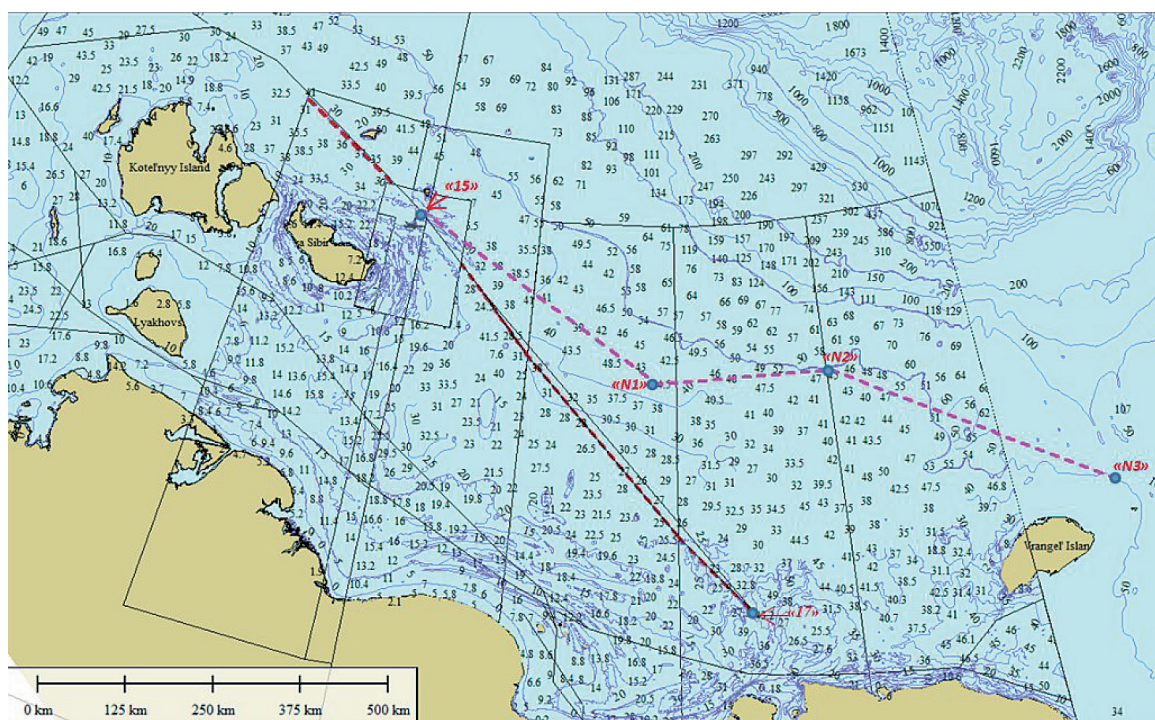


Рис. 11. Положение предлагаемой новой высокоширотной трассы в Восточно-Сибирском море на ЭНК масштаба 1 : 700000

На рис. 11 черными линиями показаны традиционные трассы СМП и высокоширотная трасса ГП (15–17). Участок трассы между точками N1 и N2 (длина 246 км) ориентировочно проходит по центру района, в котором, по спутниковым данным, в неблагоприятный в ледовом отношении в 2022 г. с начала сентября происходило первоначальное разрушение АЛМ (см. рис. 9, б, в). При использовании гидрографических судов (ГС), не имеющих ледового класса, выполнение съемки

на линии $N1-N2$ в условиях чистой воды даже в неблагоприятный в ледовом отношении год будет возможно в течение нескольких недель сентября. Съёмка на линии $I5-N1$ (длина 417 км), а также на линии новой трассы к северу от острова Врангеля: $N2-N3$ длиной 460 км по чистой воде будет возможна с середины августа до начала ноября (см. рис. 9, з, д).

Для анализа сплоченности льда АЛМ был выбран 2022 г., который выдался аномально сложным в ледовом отношении по сравнению с предшествующим периодом после 2010 г. Сплоченность многолетних льдов в конце сентября в период 2018–2021 гг., по данным архива университета Бремена, представлена на рис. 12, а–г.

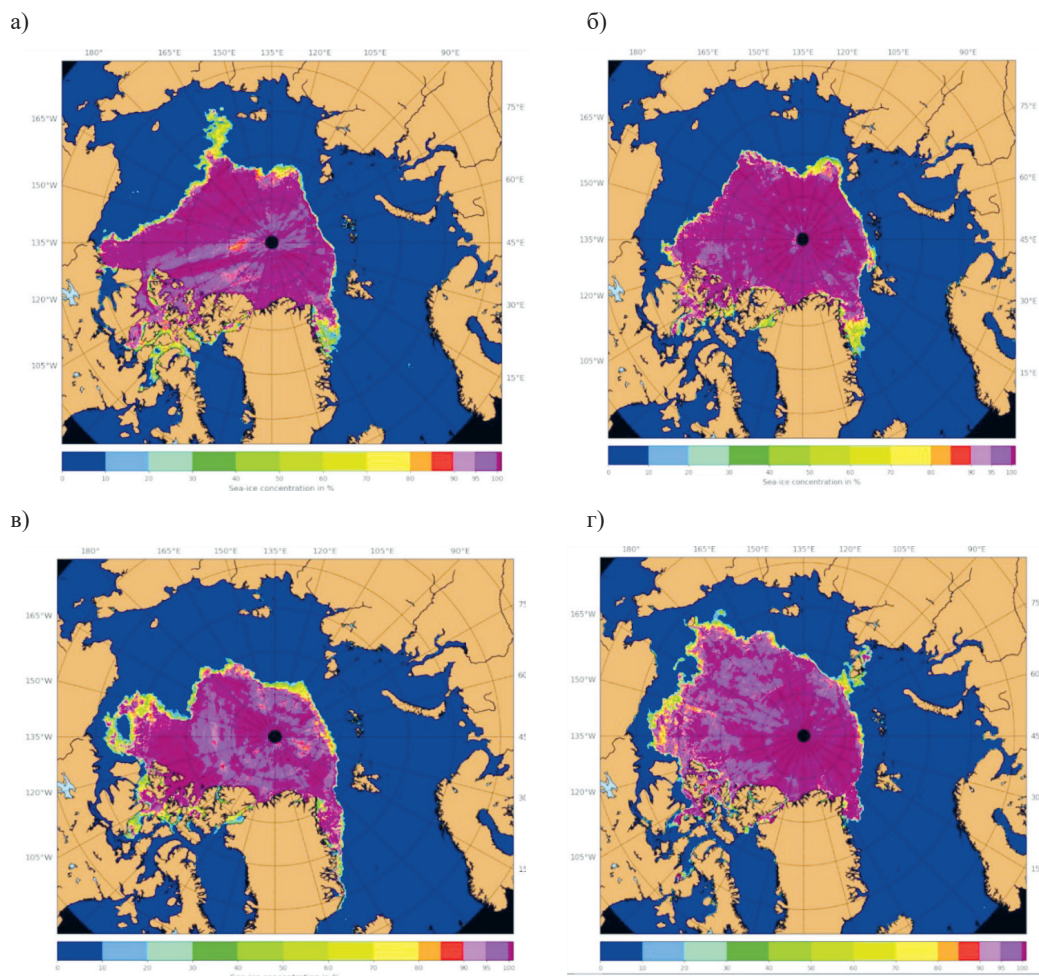


Рис. 12. Сплоченность многолетних льдов в сентябре:
а — 2018 г.; б — 2019 г.; в — 2020 г.; г — 2021 г.

Анализ сведений из этого архива, частично представленных на рис. 12, показывает, что сплоченность льдов Айонского ледового массива за последние 5 лет существенно снижается. В 2020 г. все море с августа по октябрь было свободно ото льда. Наиболее ледовитым был 2022 г., но тенденция снижения сплоченности льдов АЛМ, по-видимому, продолжится и в последующие годы, когда сложные и благоприятные ледовые условия будут чередоваться согласно данным, представленным в работе [25]. Снижение сплоченности льдов в Восточно-Сибирском море в период 2002–2021 гг., на основе анализа спутниковых данных микроволнового радиометра AMSR, отмечается также в работе [29]. У ГП нет ГС ледового класса, способных работать в центральной части моря на линии $N1-N2$ в октябре. Гидрографическое судно ледового класса Arc-6 для ГП пока находится в стадии проектирования. Возможным решением проблемы может быть использование имеющегося у МО РФ ледокола «Илья Муромец», оснащенного МЛЭ фирмы RESON и способного работать во льдах толщиной до 1 м.

Участок предлагаемой трассы между точками *N2* и *N3* (см. рис. 11) к северу от острова Врангеля остается свободным ото льда с середины августа до середины ноября (см. рис. 9, *е, ж*) что, по-видимому, связано с проникновением в Чукотское море течения, несущего более теплые и соленые воды из Берегового моря, согласно данным¹ и исследованию [27]. Использование участка трассы между точками *N2* и *N3* для навигации в осенне-зимний период обеспечит плавание по чистой воде до середины ноября. Позже здесь начнет формироваться молодой лед толщиной до 0,4–0,5 м, обеспечивающий благоприятную навигацию до конца ноября и, возможно, до середины декабря рис. 9, *е, ж*, что наглядно представлено на рис. 10, *а–г*. Участок трассы между точками *N2* и *N3* должен быть выбран с таким расчетом, чтобы он не проходил на глубинах менее 40 м ввиду возможного присутствия в этом районе стамух [30], [31], наиболее опасных для навигации в осенне-зимний период.

Обсуждение (Discussion)

Учитывая предполагаемый в будущем международный статус СМП, гидрографическая съемка по высокоширотным трассам должна выполняться с учетом требований МГО для особой либо первой «А» категорий съемки [32]. По-видимому, для трассы СМП с глубинами более 40 м возможно использование категории 1b, которая не предполагает полного акустического покрытия дна. При этом расстояние между крайними лучами полос обзора МЛЭ может быть принято равным трем глубинам. Этот вопрос требует дополнительного изучения и обоснования. В РФ нет национального стандарта для выполнения гидрографической съемки, основанного на Стандартах S-44 МГО. Этот вопрос рассмотрен в работе [33], посвященной четвертой редакции Стандартов S-44 МГО. В дальнейшем рассмотрению пятой редакции S-44 были посвящены работы [34], [35]. Инновационные требования Стандартов S-44 МГО нашли отражение в учебном пособии [36], а также в ряде публикаций, посвященных методике и контролю качества батиметрической съемки, выполненной в Арктическом бассейне для обоснования внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) [37]–[39]. Батиметрическая съемка для ВГКШ должна была проводиться на основе требований Стандартов S-44 МГО. В связи с отсутствием национальных стандартов для каждой экспедиции готовилось детальное техническое задание. Применительно к мелководной площадной съемке рельефа с применением электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС) вопросы обеспечения качества в контексте требований Стандарта S-44 МГО рассмотрены в работе [40].

Основной проблемой, препятствующей использованию устаревших норм и правил выполнения гидрографической съемки, изложенных в ПГС 4 [22], является точность глубин и координат, основанная на 63%-й доверительной вероятности, в то время как в Стандартах S-44 МГО [32] требуется представление результатов съемки с 95%-й доверительной вероятностью. Таким образом, требования к точности Стандартов S-44 в два раза выше заданных в ПГС 4 [22]. Разработку новых национальных стандартов следует считать приоритетной задачей российской гидрографии, до введения которых в части точности предоставляемых результатов съемки, целесообразно руководствоваться требованиями и нормами Стандарта S-44 МГО (2022 г.).

Дополнительной проблемой при проектировании высокоширотных трасс в мелководных районах центральной и восточной части Восточно-Сибирского моря может являться нестабильность рельефа, обусловленная донным газопроявлением. Вопросам донного газопроявления в Мировом океане и в том числе в арктических морях посвящена обширная литература, включая ряд отечественных публикаций, например, [41]–[43], которые в основном касались моря Лаптевых. Вопросы поиска районов донного газопроявления с использованием гидроакустических средств (МЛЭ) и ЭГИС в Карском море обсуждались в работах [44]–[47]. Современные МЛЭ позволяют осуществлять обнаружение донного газопроявления одновременно с выполнением площадной съемки рельефа. Изучению донного газопроявления в российской Арктике, вклю-

¹ Arctic_climate. Past_and_present. <https://www.amap.no/documents/download/1083/inline>.

чая и Восточно-Сибирское море, была посвящена совместная Российско-шведская экспедиция SWERUS-2014, в отчетах которой приведена наиболее подробная информация по применению МЛЭ для поиска донного газопроявления. Отчеты экспедиции находятся в свободном доступе в сети Интернет^{1, 2}.

Среди наиболее интересных отечественных публикаций следует отметить работу [48], в которой исследуется донное газопроявление в северо-западной части Восточно-Сибирского моря, выявленное в процессе выполнения морских сейсмических работ. Поиск «газовых сипов» в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования обсуждался в работе [49]. При этом имеется предположение, что существование новосибирской части Великой сибирской полыньи обусловлено наличием донного газопроявления в районах к северу, северо-востоку от островов Анжу.

Вопрос изучения донного газопроявления в настоящее время приобретает актуальное значение в связи с предполагаемым ресурсным освоением Восточно-Сибирского моря и требует проведения дополнительного исследования, а также учета при выборе безопасного расположения высокоширотных трасс. Созданная ГП высокоширотная трасса (основная и альтернативная) между точками 15 и 17 проходит по малым глубинам. Вновь создаваемая прибрежная трасса от точки 17 до 20 также мелководна. Трассы от точки 11 до точки 20 (см. рис. 5) не предполагают обследование донного газопроявления. Поэтому даже площадное обследование этих мелководных трасс не гарантирует безопасность плавания в связи с нестабильностью рельефа в результате донного газопроявления, связанного с деградацией вечной мерзлоты. Этот процесс в ближайшей перспективе, по-видимому, будет усиливаться. Изучение нестабильности рельефа в результате донного газопроявления в арктических морях только начинается. Публикации по прибрежным районам моря Бофорта подтверждают существенную нестабильность рельефа³. Высокоширотные трассы на больших глубинах в перспективе будут более безопасны также и в плане возможного вынужденного выхода судна из «коридора», внутри которого выполнена площадная маршрутная съемка. Этот вопрос детально исследован в работах [2], [8], [13].

Дополнительным источником информации о рельефе дна для новой высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море могут служить результаты морских геофизических работ, выполненных здесь в последние годы [48], [50]. С 2024 г. АО «РосГео» планирует проведение ежегодных геофизических работ в Восточно-Сибирском море с попутным промером ОЛЭ. Батиметрическую съемку, выполняемую в процессе геофизических работ, необходимо проводить по единой методике, а результаты представлять в 280 ЦКП для пополнения отечественной батиметрической базы данных (ББД) УНиО на арктические моря. Возможность использования таких данных лишней раз подтверждает необходимость повышения статуса 280 ЦКП ВМФ как единого национального центра, в который должны поступать результаты батиметрических съемок, выполняемых различными организациями РФ вне зависимости от их ведомственной принадлежности. В настоящее время от гидрографического и картографического обеспечения высокоширотных трасс СМП в Восточно-Сибирском море будут во многом зависеть сроки осуществления безопасной круглогодичной навигации СПГ-танкеров.

¹ The Swedish-Russian-US Arctic Ocean Investigation of Climate-Cryosphere-Carbon Interactions. The SWERUS-C3 2014. Expedition CRUISE REPORT – LEG 1 (of 2) The SWERUS Scientific Party. Cruise report SWERUS-C3 – Leg 1.pdf. [https://bolin.su.se/data/swerus/reports/leg1/Cruise%20report%20SWERUS C3%20E2%80%93%20Leg%201.pdf](https://bolin.su.se/data/swerus/reports/leg1/Cruise%20report%20SWERUS%20C3%20E2%80%93%20Leg%201.pdf).

² The Swedish-Russian-US Arctic Ocean Investigation of Climate-Cryosphere-Carbon Interactions The SWERUS-C3 2014 Expedition. CRUISE REPORT SWERUS-C3 LEG 2 Bolin Centre for Climate Research No 2. Cruise report SWERUS-C3 – Leg 2.pdf.

³ Charles K. Paulla,1,2 , Scott R. Dallimoreb,2, Young Keun Jinc , David W. Caressa, Eve Lundstena , Roberto Gwiazdaa , Krystle Andersona, John Hughes Clarked, Scott Youngblute, and Humfrey Mellingf. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. PNAS 2022 Vol. 119, No. 12 e2119105119. PP. 1–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>.

Неотложной задачей является также актуализация Руководства для сквозного плавания судов по Северному морскому пути [51] и Правил плавания по трассе СМП¹. В указанных документах следует учесть современные условия навигации на СМП, связанные с появлением СПГ-танкеров, а также гидрографическое и картографическое обеспечение высокоширотных трасс в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. В Правилах плавания по трассе СМП картографическое обеспечение вообще не упоминается. В Постановлении Правительства № 1599 от 29.12.2014² картографическое обеспечение трасс СМП было поручено Министерству транспорта (Федеральное агентство морского и речного флота). Позже Постановлением Правительства № 1418 от 21.12.2016³ оно было возвращено Министерству обороны (УНиО). Для решения проблем СМП Правительством РФ в августе 2022 г. было принято решение о создании Главного управления Северного морского пути в составе Госкорпорации «Росатом».

Распоряжением Правительства РФ № 2115-р от 1 августа 2022 г. был утвержден интегрированный план развития Северного морского пути до 2035 года⁴, первый раздел которого посвящен развитию экспортной грузовой базы, каботажных и транзитных перевозок. Во втором разделе планируется модернизация существующих арктических портов и строительство новых, создание железнодорожных и речных транспортных коридоров и дноуглубление. Третий раздел связан с развитием арктического грузового и ледокольного флотов, судостроительных и судоремонтных мощностей в арктических регионах. До 2035 г. предстоит построить 153 судна, включая 12 ледоколов и 46 судов аварийно-спасательного флота. В четвертом разделе рассмотрены планы формирования арктической спутниковой группировки, развития аварийно-спасательной службы, гидрографического и гидрометеорологического обеспечения. Необходимость создания новых ЭНК на трассах СМП в этом документе не упоминается несмотря на то, что для Восточно-Сибирского моря этот вопрос имеет особое значение.

Задачи планирования гидрографических работ и картографического обеспечения высокоширотных трасс должны стать одним из приоритетных направлений деятельности главного управления СМП. Если по результатам современных высокоточных гидрографических работ на трассах СМП не будут созданы международно-признанные ЭНК, ее превращение в международную круглогодичную транспортную магистраль может быть затруднено. В ближайшие годы предстоит большая работа для преобразования СМП в круглогодичную транспортную магистраль, обеспечивающую связь России с дальневосточным и тихоокеанским регионом. Для преобразования СМП в международную круглогодичную транспортную магистраль потребуется не одно десятилетие. Официальные ЭНК, основанные на правилах современной гидрографии, должны стать частью условий для признания СМП в качестве международной круглогодичной транспортной магистрали.

Выводы (Summary)

В результате выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на то, что Восточно-Сибирское море остается самым ледовитым из окраинных морей российской Арктики, за последние годы ледовые условия в центральной части Айонского ледяного массива существенно улучшились. Данные космического мониторинга сплоченности льдов

¹ Правила плавания в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya.html. <http://www.nsra.ru/files/fileslist/137-ru893-2020.pdf>.

² Постановление Правительства Российской Федерации от 29.12.2014 № 1599 "Об осуществлении федеральными органами исполнительной власти отдельных полномочий в целях реализации Федерального закона «О навигационной деятельности и о внесении изменений в Положение о полномочиях федеральных органов исполнительной власти по поддержанию, развитию и использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах обеспечения обороны и безопасности государства, социально-экономического развития Российской Федерации и расширения международного сотрудничества, а также в научных целях». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201501040025>.

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 21.12.2016 № 1418 "О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612260028>.

⁴ Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2022 № 2115-р «Об утверждении Плана развития Северного морского пути на период до 2035 года». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_423713/e352a42f02b825088518c580070a2ea84a9cec57.

позволяют обосновать возможность создания новых высокоширотных трасс СМП в центральной и восточной части моря.

2. Условиями выбора новой высокоширотной трассы в Восточно-Сибирском море является наличие больших глубин, а также осеннее разряжение ледового покрытия в центральной части Айонского ледяного массива по параллели 74° с. ш. даже в сложных ледовых условиях (например, в 2022 г.).

3. Участок предлагаемой новой высокоширотной трассы, пересекающей Айонский ледяной массив по параллели $\approx 74^{\circ}$ с.ш. в его центральной части (меридиан $\approx 169^{\circ}$ в. д.), может быть доступен для выполнения маршрутной площадной съемки по чистой воде, используя ГС, не имеющие ледовый класс даже в годы, неблагоприятные по ледовитости (сплоченности льдов) в течение нескольких недель сентября.

4. Другие участки новой высокоширотной трассы могут быть доступны для выполнения съемки с середины августа до конца октября. Участок трассы к северу и востоку от острова Врангеля в октябре и ноябре имеет меньшую ледовитость, чем новая трасса СМП вдоль сибирского берега в Чукотском море, и более удобен для навигации крупнотоннажных судов, включая СПГ-танкеры типа Yamalmax, без ледокольного сопровождения.

5. Обследованная ГП высокоширотная трасса в обход Айонского ледяного массива и далее в проливе Лонга пока не нанесена на все существующие ЭНК Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Эта трасса нанесена на ЭНК масштаба 1 : 2 000 000 и 1 : 700 000, изданных в 2016 г., но на некоторых ЭНК масштаба 1 : 180 000 она пока отсутствует.

На основе оценки текущего состояния картографического обеспечения Восточно-Сибирского моря дополнительно можно сделать следующие выводы:

1. В период 2012–2022 гг. в ГП созданы ЦСИН по новым трассам СМП, которые не являются официальными государственными ЭНК РФ. Эти ЦСИН не переданы в 280 ЦКП ВМФ, которое является единственной в стране организацией, ответственной за издание государственных НМК и ЭНК РФ.

2. Гидрографическая съемка на трассах СМП выполняется на основе правил, не соответствующих требованиям Стандарта S-44 МГО. Поскольку национальные требования к гидрографической съемке, основанные на S-44, отсутствуют, необходима их незамедлительная разработка.

3. Необходимо обеспечить передачу всех доступных батиметрических материалов по арктическим морям, включая Восточно-Сибирское море, полученных различными ведомствами РФ, в 280 ЦКП ВМФ для создания ББД УНиО по Северному Ледовитому океану.

4. Маршрутные площадные гидрографические съемки на трассах СМП с использованием МЛЭ и ЭГИС целесообразно проводить одновременно с регистрацией данных водной толщи, что обеспечит поиск районов интенсивного донного газопроявления, потенциально опасного для мореплавания и имеющего также ресурсное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олерский В. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия — XXI век. — 2015. — № 29. — С. 8–9.
2. Афонин А. Б. Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
3. Afonin A. Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route / A. Afonin, E. Olkhovik, A. Tezikov // Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. — IGI Global, 2019. — Pp. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.
4. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
5. Vukovic N. A. Prospects of development of the transnational transport corridor of the northern sea route based on Sabetta sea port / N. A. Vukovic, Z. A. Mingaleva, A. V. Mekhrentsev // R-Economy. — 2019. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 19–24. DOI: 10.15826/recon.2019.5.1.003.

6. Тезиков А. Л. Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.
7. Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
8. Андреева Е. В. Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
9. Афонин А. Б. Повышения эффективности съемки рельефа дна в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 302–309. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-302-309.
10. Афонин А. Б. Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съемки рельефа дна / А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
11. Афонин А. Б. Исследование влияния подробности гидрографической съёмки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королёв, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9 — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
12. Афонин А. Б. Оптимизация съёмки рельефа дна в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Навигация и гидрография. — 2022. — № 67. — С. 37–45.
13. Ольховик Е. О. Обоснование плана проведения площадного обследования высокоширотных маршрутов / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 296–304. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-296-304.
14. Ольховик Е. О. Влияние льда на формирование судоходных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик, Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.
15. 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.
16. 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.
17. Исаулова К. Я. Исследование навигационно-гидрографических характеристик заприпайных полыней восточного сектора Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.
18. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
19. Гуков А. Ю. Великая сибирская полынья, век XXI / А. Ю. Гуков // Наука и техника в Якутии. — 2009. — № 1 (16). — С. 99–103.
20. Каталог карт и книг Северный Ледовитый океан. УНиО МО РФ. Адмиралтейский № 7107. — СПб.: УНиО, 2020. — 79 с.
21. Каталог электронных навигационных карт. Юрисдикция Российской Федерации. — СПб.: УНиО МО РФ. — 81 с.
22. Правила гидрографической службы № 4. Съёмка рельефа дна. Ч. 2 : Требования и методы. — Изд. Министерства обороны СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1984. — 264 с.

23. Юлин А. В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А. В. Юлин, М. В. Шаратунова, Е. А. Павлова, В. В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64. — № 3 (117). — Рр. 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.
24. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
25. Холопцев А. В. Анализ изменений ледовых условий на Северном морском пути в конце XX — начале XXI века / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.
26. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.: Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. — 640 с.
27. Моря российской Арктики в современных климатических условиях. — СПб: ААНИИ, 2021. — 360 с.
28. Соколова Ю. В. Сравнение самостоятельного движения и движения под проводкой ледокола газозовов типа «YAMALMAX» / Ю. В. Соколова, О. С. Девятаев, Е. В. Афанасьева, Ю. М. Титова // Российская Арктика. — 2020. — № 11. — С. 39–58. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12515.
29. Pang X. Analysis of sea ice conditions and navigability in the Arctic Northeast Passage during the summer from 2002–2021 / X. Pang, C. Zhang, Q. Ji, Y. Chen, Z. Zhen, Y. Zhu, Z. Yan // Geo-spatial Information Science. — 2022. — Рр. 1–15. DOI: 10.1080/10095020.2022.2124128.
30. Платонова Е. В. Многолетние наблюдения за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковых данных / Е. В. Платонова, И. А. Бычкова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2018. — № 53. — С. 103–112.
31. Создан атлас опасности прибрежно-шельфовой зоны российской Арктики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rscf.ru/news/earth-sciences/atlas-opasnosti-pribrezhno-shelfovoy-zony/> (дата обращения: 01.08.2023).
32. IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. — 43 p.
33. Фирсов Ю. Г. К вопросу о нормативных документах для выполнения гидрографических работ / Ю. Г. Фирсов // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 97–107.
34. 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.
35. 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.
36. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с.
37. Фирсов Ю. Г. Анализ методики использования глубоководного многолучевого эхолота EM 122 при выполнении батиметрической съемки в Северном Ледовитом океане / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 60–66.
38. Фирсов Ю. Г. Контроль качества многолучевой батиметрической съемки в Северном Ледовитом океане на научно-экспедиционном судне «Академик Федоров» / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 39–45.
39. Фирсов Ю. Г. Методика и контроль качества батиметрической съемки в высокоширотных зонах Арктики, значимых для определения внешней границы континентального шельфа России / Ю. Г. Фирсов, В. Д. Каминский, В. А. Поселов // VII Российская научно-техническая конференция «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности», НГО-2011 // Труды Конференции. — СПб.: ГНИНГИ, 2011. — С. 325–330.
40. Фирсов Ю. Г. Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2014 — № 3 (25) — С. 171–179.
41. Shakhova N. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatin,

D. Chernykh, D. Kosmach, G. Pantelev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, O. Gustafsson // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 2015. — Vol. 373. — Is. 2052. — Pp. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.

42. Chernykh D. Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: A case study from the laptev sea shelf / D. Chernykh, V. Yusupov, A. Salomatin, D. Kosmach, N. Shakhova, E. Gershelis, A. Konstantinov, A. Grinko, E. Chuvilin, O. Dudarev, A. Koshurnikov, I. Semiletoy // *Geosciences*. — 2020. — Vol. 10. — Is. 10. — Pp. 411. DOI: 10.3390/geosciences10100411.

43. Черных Д. В. Новый акустический метод количественной оценки пузырькового потока метана в системе донные отложения — водная толща и его реализация на примере моря Лаптевых, Северный Ледовитый океан / Д. В. Черных, В. И. Юсупов, А. С. Саломатин, Д. А. Космач, А. В. Константинов, В. И. Силионов, А. К. Мазуров, А. Н. Салюк [и др.] // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2018. — Т. 329. — № 11. — С. 153–167. DOI: 10.18799/24131830/2018/11/218.

44. Фирсов Ю. Г. Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.

45. Колосков Е. Н. Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.

46. Кожухов И. В. Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей / И. В. Кожухов, Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 4 (32). — С. 95–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-123-129.

47. Ананьев Р. А. Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе арктических морей / Р. А. Ананьев, Н. Н. Дмитриевский, А. Г. Росляков [и др.] // *Океанология*. — 2022. — Т. 62. — № 1. — С. 151–157. DOI: 10.31857/S0030157422010014.

48. Богоявленский В. И. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового Океана: Восточно-Сибирское море / В. И. Богоявленский, А. В. Кишанков, А. Г. Казанин, Г. А. Казанин // *Арктика: экология и экономика*. — 2022. — Т. 12. — № 2 (46). — С. 158–171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171.

49. Бондур В. Г. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования / В. Г. Бондур, Т. В. Кузнецова // *Исследование земли из космоса*. — 2015. — № 4. — С. 30–43. DOI: 10.7868/S020596141504003X.

50. Мельников П. Н. Итоги геологоразведочных работ на арктическом шельфе России в 2014–2019 гг. и перспективы проведения работ на ближайшее время / П. Н. Мельников, М. Б. Скворцов, М. Н. Кравченко [и др.] // *Геология нефти и газа*. — 2019. — № 6. — С. 5–18. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-6-5-18.

51. Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. — СПб.: Изд. ГУНИО МО РФ, 1995. — 415 с.

REFERENCES

1. Olerskii, V. “Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti.” *Transportnaya strategiya — XXI vek* 29 (2015): 8–9.

2. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. “The concept of development of shipping routes along the northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.

3. Afonin, Andrey, Evgeniy Olkhovik, and Alexander Tezikov. “Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route.” *Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic*. IGI Global, 2019. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.

4. Ol'khovik, Evgeniy O. “Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.

5. Vukovic, Natalya A., Zhanna A. Mingaleva, and Andrey V. Mekhrentsev. “Prospects of development of the transnational transport corridor of the northern sea route based on Sabetta sea port.” *R-Economy* 5.1 (2019): 19–24. DOI: 10.15826/recon.2019.5.1.003.

6. Tezikov, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. “The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area.” *Transport of Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.

7. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
8. Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezikov. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
9. Afonin, Andrej B. "Improving the hydrographic survey efficiency in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 302–309. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-302-309.
10. Afonin, A.B., E. O. Ol'hovik, and A. L. Tezikov. "Development of the assessment methods of anadromous depths on the Northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
11. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
12. Afonin, A.B. "Optimization of the bottom relief survey in the waters of the Northern Sea Route." *Navigation and Hydrography* 67 (2022): 37–45.
13. Ol'hovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "A planning rationale for conducting the areal surveys of high-latitude routes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 296–304. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-296-304.
14. Olkhovik, E.O., E. V. Andreeva, and A. L. Tezikov. "Ice influence on forming shipping routes in the water area of the Northern Sea Route." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2019): 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.
15. 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.
16. 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.
17. Isaulova, Kristina Ya. "Research of navigational and hydrographic characteristics of flaw polynyas of the eastern sector of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.
18. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
19. Gukov, A. Yu. "Velikaya sibirskaya polyn'ya, vek XXI." *Nauka i tekhnika v Yakutii* 1(16) (2009): 99–103.
20. *Katalog kart I knig. Severni Ledoviti Okean. UNiO MO. RF. Admiralteisky nomer 7107.* SPb.: UNiO, 2009.
21. *Katalog elektronnih navigazionnih kart. Urizdikzia Rossiskoi Federasii.* SPb.: UNiO MO RF.
22. *Pravila gidrograficheskoi sluzhby № 4. S'emka rel'efa dna. Chast' 2. Trebovaniya i metody.* Izd. Ministerstva Oborony SSSR. Glavnoe upravlenie navigatsii i okeanografii, 1984.
23. Yulin, A. V., M. V. Sharatunova, E. A. Pavlova, and V. V. Ivanov. "Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian sea." *Arctic and Antarctic Research* 64.3(117) (2018): 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.
24. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. "The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
25. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Analysis of ice situation changes on the Northern Sea Route in the late XX — early XXI century." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.
26. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii.* M.: Obninsk: IG-SOTsIN, 2017.
27. *Morya rossiiskoi Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh.* SPb.: AANII, 2021.

28. Sokolova, Yu.V., O. S. Devyataev, E. V. Afanasyeva, and Yu. M. Titova. "Comparison of independent navigation of LNG carriers of type yamalmax and their transition with an icebreaker escort." *Russian Arctic* 11 (2020): 39–58. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12515.
29. Pang, Xiaoping, Chenlei Zhang, Qing Ji, Yizhuo Chen, Zeng Zhen, Yamin Zhu, and Zhongnan Yan. "Analysis of sea ice conditions and navigability in the Arctic Northeast Passage during the summer from 2002–2021." *Geo-spatial Information Science* (2022): 1–15. DOI: 10.1080/10095020.2022.2124128.
30. Platonova, E.V., and I. A. Bychkova. "Long-term observation of grounded hummocks in the Eastern Siberian sea on satellite data." *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* 53 (2018): 103–112.
31. Sozdan atlas opasnosti pribrezhno-shel'fovoi zony rossiiskoi Arktiki. Web. 1 Aug. 2023 <<https://rscf.ru/news/earth-sciences/atlas-opasnosti-pribrezhno-shelfovoy-zony/>>.
32. *IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition)*. S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2020.
33. Firsov, Yu. G. "K voprosu o normativnykh dokumentakh dlya vypolneniya gidrograficheskikh rabot." *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 97–107.
34. 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.
35. 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.
36. Firsov, Yu. G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2010.
37. Firsov, Yu. G. "The analysis of implementation of deepwater multi beam echo sounder EM 122 for conducting the bathymetric survey in the Arctic Ocean." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(62) (2010): 60–66.
38. Firsov, Yu. G. "Quality control of the multibeam swath bathymetric survey in the Arctic ocean on board research vessel "Academic Fedorov"." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 39–45.
39. Firsov, Yu. G., V. D. Kaminskii, and V. A. Poselov. "Metodika i kontrol' kachestva batimetricheskoi s"emki v vysokoshirotnykh zonakh Arktiki, znachimykh dlya opredeleniya vneshnei granitsy kontinental'nogo shel'fa Rossii." *VII Rossiiskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Navigatsiya, gidrografiya i okeanografiya: priority razvitiya i innovatsii morskoi deyatel'nosti», NGO-2011, Trudy Konferentsii*. SPb.: GNINGI, 2011. 325–330.
40. Firsov, Yu. G. "The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(25) (2014): 171–179.
41. Shakhova, Natalia, Igor Semiletov, Valentin Sergienko, Leopold Lobkovsky, Vladimir Yusupov, Anatoly Salyuk, Alexander Salomatin, Denis Chernykh, Denis Kosmach, Gleb Panteleev, Dmitry Nicolsky, Vladimir Samarkin, Samantha Joye, Alexander Charkin, Oleg Dudarev, Alexander Meluzov, and Orjan Gustafsson. "The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 373.2052 (2015): 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
42. Chernykh, Denis, Vladimir Yusupov, Aleksandr Salomatin, Denis Kosmach, Natalia Shakhova, Elena Gershelis, Anton Konstantinov, Andrey Grinko, Evgeny Chuvilin, Oleg Dudarev, Andrey Koshurnikov, and Igor Semiletov. "Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: A case study from the laptev sea shelf." *Geosciences* 10.10 (2020): 411. DOI: 10.3390/geosciences10100411.
43. Chernykh, D. V., V. I. Yusupov, A. S. Salomatin, D. A. Kosmach, A. V. Konstantinov, V. I. Silionov, A. K. Mazurov, A. N. Salyuk, N. E. Shakhova, O. Gustafsson, A. A. Kolyubakin, E. V. Gershelis, L. I. Lobkovsky, and I. P. Semiletov. "New acoustical technique to quantify methane ebullition in sediment water column: a case study in the laptev sea, the arctic ocean." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 329.11 (2018): 153–167. DOI: 10.18799/24131830/2018/11/218.
44. Firsov, Yu. G., M. V. Ivanov, and E. N. Koloskov. "The new stage of the Russian northern basins bathymetric investigations — Kara sea example." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 115–124.
45. Koloskov, E. N., and Yu. G. Firsov. "Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the russian northern seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.

46. Kozhuhov, I. V., E. N. Koloskov, and Yu. G. Firsov. "Elektronnaya inzhenernaya gidrografiya i perspektivy polucheniya novykh dannykh po morfologii i geoekologii arkticheskikh morej." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 95–103.

47. Ananiev, R. A., N. N. Dmitrevsky, A. G. Roslyakov, D. V. Chernykh, I. P. Semiletov, E. A. Moroz, and Y. A. Zarayskaya. "Acoustic monitoring of gas emission processes in the arctic shelf seas." *Oceanology* 62.1 (2022): 127–132. DOI: 10.1134/S0001437022010015.

48. Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Aleksei Vladimirovich Kishankov, Aleksey Gennadyevich Kazanin, and Gennady Alekseyevich Kazanin. "Dangerous gas-saturated objects in the world ocean: the east siberian sea." *Arctic: ecology and economy* 12.2(46) (2022): 158–171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171.

49. Bondur, V. G., and T. V. Kusnetsova. "Detecting Gas Seeps in Arctic Sea Water Areas Using Remote Sensing Data." *Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics* 4 (2015): 30–43 DOI: 10.7868/S020596141504003X.

50. Mel'nikov, P. N., M. B. Skvortsov, M. N. Kravchenko, I. G. Agadzhanyants, O. V. Grushevskaya, and I. V. Uvarova. "The results of geological exploration on the russian arctic shelf in 2014–2019 and prospects for future development." *Russian Oil And Gas Geology* 6 (2019): 5–18. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-6-5-18.

51. *Rukovodstvo dlya skvoznogo plavaniya sudov po Severnomu morskому puti*. SPb.: Izd. GUNIO MO RF, 1995.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Позенкова Дарья Андреевна —
инженер
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: dariapozenkova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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
Pozenkova, Daria A. —
engineer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: dariapozenkova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 августа 2023 г.
Received: August 23, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-767-782

REVIEW OF SCHEMES FOR TRANSPORT-GEOGRAPHICAL ZONING OF THE ARCTIC WATER AREA

D. S. Kidzhi^{1,2}

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

² — FSUE Atomflot, Murmansk, Russian Federation

The retrospective and modern schemes for geographic and transport zoning of the Arctic and the Northern Sea Route are examined. The historical research method, which consists in identifying and analyzing documented facts, historical processes and their logic in terms of clarifying development, is used. There are several stages in the formation of zones and areas in the waters of the Arctic seas. The time period chosen for the review is from the beginning of the 19th century to the present in chronological order. International relations, national legal and natural conditions, and country characteristics are taken into account. The evolution of the organizational structure for managing the operation of the transport system of the Northern Sea Route, from the creation of the first administration to the present day, is considered. The countries of the Arctic Council have not yet developed a uniform approach to such tasks as the classification of ice (ice conditions) and requirements for the design of a vessel (ship ice class). Most countries use the definitions from the Polar Code. Individual countries apply their own rules and classification. The Russian Federation, for example, when choosing criteria for the admission of ships, uses both the national classification (Arc4-Arc9) and the Baltic one (Ice1-Ice3), while recognizing the ice classes of ships according to the International Association of Classification Societies. The results of a comparison of the Arctic Council countries on the presence of signs for development of transport-geographical zoning and navigation management in the Polar waters are presented. In conclusion, a list of tasks, the solution of which will contribute to the future transition from geographical to transport zoning of the Northern Sea Route and the Polar waters as a whole, is provided.

Keywords: Arctic, Northern Sea Route, zoning schemes, Polar waters, maritime transport.

For citation:

Kidzhi, Diana S. "Review of schemes for transport-geographical zoning of the Arctic water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 767–782. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-767-782.

УДК 528.47

ОБЗОР СХЕМ ТРАНСПОРТНО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ АКВАТОРИИ АРКТИКИ

Д. С. Киджи^{1,2}

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

² — ФГУП «Атомфлот», Мурманск, Российская Федерация

В обзоре рассматриваются ретроспективные и современные схемы географического и транспортного районирования Арктики и Северного морского пути. В работе использован исторический метод исследований, заключающийся в анализе задокументированных фактов, исторических процессов и их логики. Выделены этапы формирования зон и районов в акватории арктических морей. Выбран временной период с начала XIX в. по настоящее время в хронологическом порядке. В процессе работы учитывались международные взаимоотношения, национальные правовые и естественные условия и иные особенности. Рассмотрена эволюция организационной структуры управления работой транспортной системы Северного морского пути от создания первой администрации до настоящего времени. Отмечается, что в странах Арктического совета до сих пор не сформирован единообразный подход к таким задачам, как классификация льда (ледовой обстановки), и требования к конструкции судна (ледовому классу судна). Большинство из них используют определения из Полярного кодекса, отдельные страны применяют собственные правила и классификацию (например, Российская Федерация при выборе критериев допуска судов использует как национальную

классификацию (Arc4–Arc9), так и шведско-финскую (балтийскую), признавая при этом ледовые классы судов согласно Международной ассоциации классификационных обществ. Приведены результаты сравнения стран Арктического совета по наличию признаков развития транспортно-географического районирования и управления судоходством в полярных водах, а также перечень задач, решение которых, по мнению автора, будет способствовать будущему переходу от географического к транспортному районированию Северного морского пути и акватории полярных вод в целом.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, схемы районирования, полярные воды, морской транспорт, движение судов, судоходные пути.

Для цитирования:

Киджи Д. С. Обзор схем транспортно-географического районирования акватории Арктики / Д. С. Киджи // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 767–782. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-767-782.

Введение (Introduction)

Карты-схемы районирования Севера России [1], [2] нашли широкое применение как в различных областях науки, так и в задачах устойчивого и пространственного развития при решении проблем связанности регионов. Однако концептуальное обоснование научных подходов к географическому и транспортному районированию акваторий арктических морей Российской Федерации находится в состоянии развития и поиска методов и моделей, использование которых возможно для транспортного районирования Северного морского пути (СМП) в будущем.

Географические основы транспортного освоения территорий, подробно изложенные в монографии [3], в большинстве случаев относятся к наземным видам транспорта, использование водного транспорта в таких схемах требует дополнительных знаний и исследований в смежных науках. Например, в работе [4] выполнен масштабный анализ движения судов за период 1980–2017 гг. и сделано предположение о том, что маршруты судоходства в Арктике могут существенно изменить географию морских перевозок в отношении глобальных сетей контейнерных перевозок и трамповых перевозок, т. е. уже в обозримом будущем произойдет реконфигурация существующих судоходных сетей маршрутов или появятся новые, ориентированные как на существующие, так и на перспективные пункты отправки и назначения груза.

Предлагаемый обзор направлен на формирование базиса для создания и развития методов и моделей, способных обосновать стратегическое долгосрочное транспортное районирование акватории СМП и разработку политики в крупных географических масштабах Арктики с целью подготовки к прогрессирующему развитию как морской транспортной системы, так и прибрежных арктических территорий Российской Федерации, где формируется основная грузовая база. Одним из недостатков существующих схем районирования СМП является то, что они в большинстве случаев имеют сугубо географический характер в границах четырех арктических морей Российской Федерации, не учитывая формирование транспортного районирования, пространственных, локальных или территориальных связей.

Целью данной работы является систематизация, обобщение и анализ существующих схем районирования акватории СМП, рассмотрение методов и моделей, позволяющих выполнить переход от географического к транспортному районированию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данном обзоре использован исторический метод исследований, состоящий в выявлении и анализе задокументированных фактов, для восстановления исторического процесса и логики развития исследуемых переходов и уточнений схем районирования. Все существенные факты рассмотрены в работе в хронологической последовательности. Дополнительно проанализированы внутренние и внешние связи объекта и предмета данного исследования.

Объектом исследования является судоходные акватории арктических морей СМП, предметом исследования — методы, модели и схемы географического и транспортного районирования СМП.

Исследован временной период с начала XIX в. по настоящее время в хронологическом порядке. В процессе подготовки были использованы литературные источники и базы данных: РИНЦ, Scopus, Web of Science.

Результаты (Results)

Географически Северный морской путь (СМП) является составной частью Северо-Восточного морского прохода в Северном Ледовитом океане, в пределах которой проходят основные судоходные пути. Он расположен в полосе от архипелага Новая Земля на западе до Берингова пролива на востоке и включает внутренние морские воды, территориальные воды, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации.

Советский период

Для решения задач освоения (СМП) в 30-е гг. XX в. в СССР был принят Декрет № 1606 и Постановление Совета народных комиссаров СССР № 1873 от 17.12.1932, учредившие Главное управление СМП, в задачи которого входило систематическое изучение морского единого и неделимого пространства советской Арктики, при этом задачи установления границ водных путей и районирования морских акваторий не ставились, поскольку их изученность была крайне недостаточной. В поздний советский период акватория СМП была географически разделена, в соответствии с Положением [5], на две части:

- Западный район — от западных входов в Новоземельские проливы и мыса Желания до меридиана 125° в. д. с включением акватории архипелага Земля Франца-Иосифа и других островов, а также участков реки Енисей до п. Игарка, реки Хатанга до п. Хатанга и Обской губы до мыса Каменный;
- Восточный район — от 125° в. д. до Берингова пролива с включением островов и участков реки Колыма до порта Зеленый мыс.

Границы СМП в советский период отличались от современных. Так, замерзающие части Баренцева, Берингова и Охотского морей, акватория архипелага Земля Франца-Иосифа и других островов условно относились к СМП, а фактически — к границам наибольшего распространения плавучего льда [6]. В 1966 г. было издано первое «Наставление для плавания по Северному морскому пути» [7].

14 сентября 1990 г. Министерством морского флота СССР, согласно Постановлению [8] Совета Министров СССР от 1 июня 1990 г. № 565, были разработаны и утверждены «Правила плавания по трассам Северного морского пути» (далее — Правила плавания), впервые учитывающие положения «Конвенции ООН по морскому праву 1982 г.» [9], касающиеся покрытых льдом районов моря. При этом устанавливался уведомительный порядок доступа иностранных судов на трассы СМП. В развитие Правил плавания было выпущено «Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути» [10], включающее навигационное описание и правила плавания по трассам СМП, правила ледокольной-лоцманской проводки по СМП, национальные требования к конструкции, оборудованию и снабжению судов, следующих по СМП.

В Правилах плавания 1990 г. закреплено следующее определение: «*Северный морской путь — это расположенная во внутренних морских водах, территориальном море (территориальных водах) или экономической зоне СССР, прилегающих к северному побережью СССР, его национальная транспортная коммуникация, включающая пригодные для ледовой проводки судов трассы, крайние пункты которых ограничены на западе западными входами в Новоземельские проливы и меридианом, проходящим на север от мыса Желания, и на востоке, в Беринговом проливе, параллелью 66° северной широты и меридианом 168°58'37" западной долготы*»¹.

Одним из важных этапов в советский период являлось изучение высокоширотных районов Северного Ледовитого океана для развития судоходства с использованием при этом дрейфующих станций. В советский период схемы транспортного районирования СМП не применялись ввиду недостаточной изученности акваторий арктических морей, сложной ледовой обстановки и т. п. Необходимо отметить, что в советский период были проведены масштабные фундаментальные

¹ Правила плавания по трассам Северного морского пути / Утверждены Министерством морского флота СССР 14 сентября 1990 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pandia.ru/text/80/156/32367.php> (дата обращения: 24.08.2023).

исследования, которые до сих пор являются научной основой для освоения и развития СМП. Разделение СМП на две части по меридиану 125° в. д. в тот период явилось первой попыткой пространственного разделения с целью обеспечить полное покрытие акватории имеющимися ледоколами одновременно с запада и востока, а с точки зрения организации управления судоходством и ледокольным сопровождением — с целью разграничения полномочий и ответственности штабов морских операций западного и восточного районов. Также следует отметить, что за «арктическую зону» в советский период условно принималась зона, ограниченная параллелью 66° с. ш.

Постсоветский период

В работах [11]–[17] рассмотрены проблемы транспортной системы СМП постсоветского периода, когда впервые возникла идея разработки комплексных программ развития СМП и арктических территорий Российской Федерации с учетом создания новой правовой, нормативной и технической базы, развития и оказания необходимой поддержки регионам и предприятиям, а также развития инфраструктурных проектов, включая портовую инфраструктуру.

Очередным этапом районирования СМП, в том числе транспортного, определения и уточнения его границ и создания организационной структуры является 2012 г., когда был принят Федеральный закон от 28.07.2012 г. № 132-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути» [18]. В соответствии с ним, в Кодексе торгового мореплавания РФ понятие акватории СМП было определено следующим образом: «Под акваторией Северного морского пути понимается водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации и ограниченное с востока линией разграничения морских пространств с Соединенными Штатами Америки и параллелью мыса Дежнева в Беринговом проливе, с запада меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля и западными границами проливов Маточкин Шар, Карские Ворота, Югорский Шар»¹.

Границы морей, а также заливов и проливов, входящих в акваторию СМП, приведены в пособии «Границы океанов и морей» [19]. В качестве ориентирных пунктов, к которым привязаны границы акваторий, приняты мысы и другие характерные объекты береговой линии с их географическими координатами.

В марте 2013 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации от № 358-р [20] создано Федеральное государственное казенное учреждение «Администрация Северного морского пути», которое было передано в ведение Росморречфлота. Основными задачами этого учреждения являлись организация плавания судов в акватории Северного морского пути, обеспечение безопасности мореплавания и защиты морской среды от загрязнения с судов. По данным Администрации СМП, границы СМП [21] были формализованы и ограничены на западе западными входами в Новоземельские проливы и меридианом, проходящим на север от мыса Желания, на востоке в Беринговом проливе параллелью 66° с. ш. и меридианом $168^\circ 58' 37''$ з. д. Схема границ акватории СМП на данный период приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема границы акватории Северного морского пути [21]

¹ Федеральный закон от 30.04.1999 № 81-ФЗ «Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/12115482/> (дата обращения: 22.08.2023).

Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 17.01.2013. № 7 были утверждены Правила плавания в акватории СМП [22], в которых впервые было выделено семь географических участков акватории Северного морского пути:

- юго-западная часть Карского моря (рис. 2, а);
- северо-восточная часть Карского моря (рис. 2, б);
- западная часть моря Лаптевых (рис. 2, в);
- восточная часть моря Лаптевых (рис. 2, г);
- юго-западная часть Восточно-Сибирского моря (рис. 2, д);
- северо-восточная часть Восточно-Сибирского моря (рис. 2, е);
- Чукотское море (рис. 2, ж).

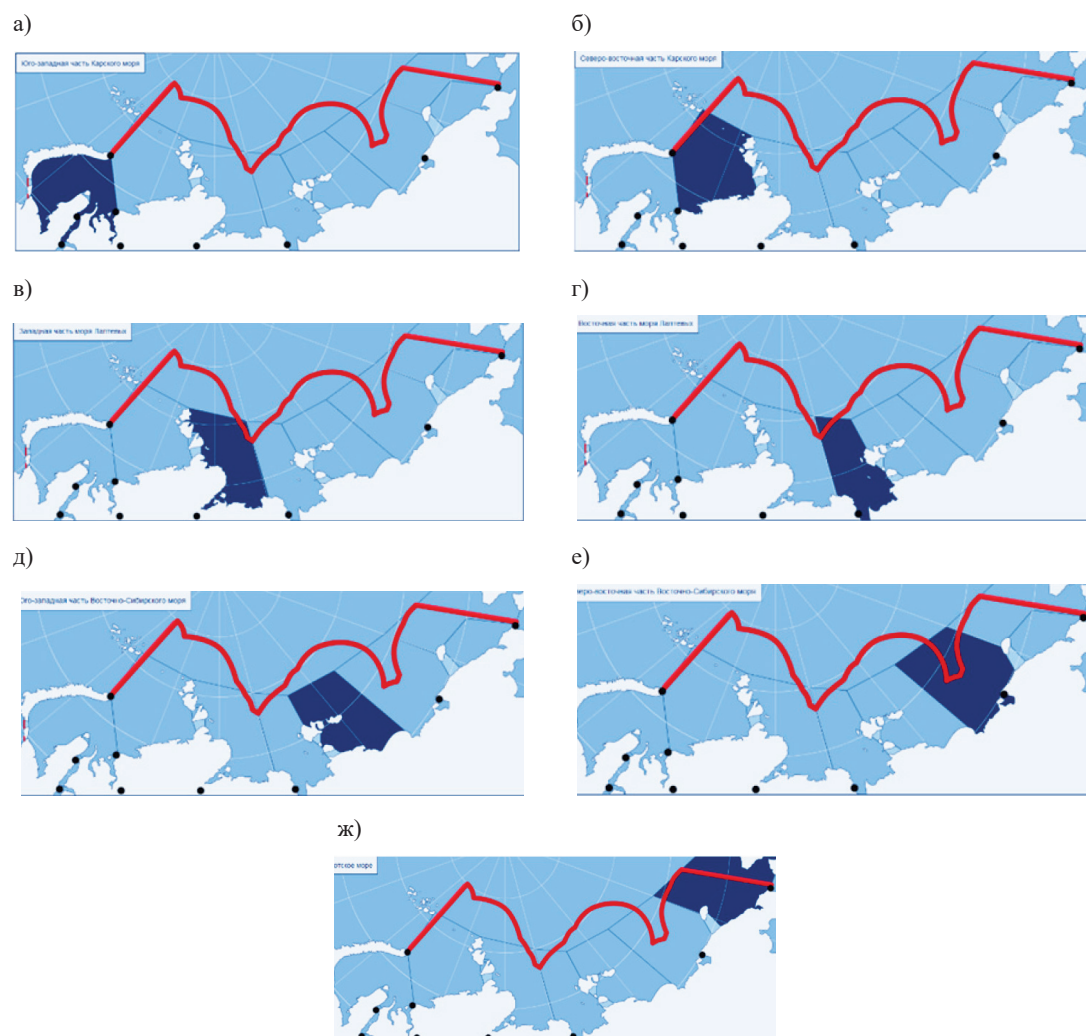


Рис. 2. Участки акватории Северного морского пути:

- а* — юго-западная часть Карского моря; *б* — северо-восточная часть Карского моря;
в — западная часть моря Лаптевых; *г* — восточная часть моря Лаптевых;
д — юго-западная часть Восточно-Сибирского моря;
е — северо-восточная часть Восточно-Сибирского моря; *ж* — Чукотское море [21]

Данные участки акватории СМП определяли критерии допуска судов по ледовому классу судна и способу ледового плавания (самостоятельное плавание или плавание под проводкой ледокола). В рассматриваемых критериях учитывался также период навигации (зимне-весенняя — с 16 ноября по 31 декабря и с января по июнь и летне-осенняя — с 01 июля по 15 ноября). Таким образом, в период 2012–2020 гг. для СМП была разработана современная нормативная и правовая база, установлены географические границы акватории, создана Администрация СМП, утверждены

Правила плавания в акватории СМП, выделено семь участков акваторий арктических морей, установлены критерии допуска судов на СМП, введены ограничения по ледовому классу судна и периоду навигации, определены условия самостоятельного плавания судов, плавания под проводкой ледокола и т. п. Недостатками районирования СМП в рассматриваемый период являлось то, что оно по-прежнему имело только географический характер в границах четырех арктических морей Российской Федерации, транспортная составляющая была зависимой и относилась к допуску судов и условиям их плавания.

Современное состояние

Федеральным законом Российской Федерации от 27 декабря 2018 г. № 525-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» наделена полномочиями оператора СМП. 23 декабря 2019 г. Правительством РФ был утвержден «План развития инфраструктуры СМП до 2035 г.», подготовленный Государственной корпорацией «Росатом» [23], отвечающей за организацию плавания судов в акватории СМП. Навигационно-гидрографическое обеспечение плавания судов в акватории СМП осуществляется Федеральным агентством морского и речного транспорта и Госкорпорацией «Росатом». Ледокольная проводка судов в акватории СМП осуществляется в соответствии с установленными правилами [24], утвержденными Министерством транспорта Российской Федерации по согласованию с Госкорпорацией «Росатом».

Географически в российской Арктике действуют две морские администрации портов.

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Администрация морских портов Западной Арктики» [25]. Перечень морских портов, входящих в администрацию: Архангельск, Варандей, Витино, Диксон (расположен в акватории Северного морского пути), Дудинка (расположен в акватории Северного морского пути), Кандалакша, Мезень, Мурманск, Нарьян-Мар, Онега, Сабетта (расположен в акватории Северного морского пути), Хатанга (расположен в акватории Северного морского пути).

2. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Администрация морских портов Приморского края и Восточной Арктики» [26]. Перечень морских портов [27], входящих в администрацию: Анадырь, Беринговский, Владивосток, Восточный Зарубино, Находка, Ольга, Певек (расположен в акватории СМП), Посьет, Провидения, Тикси (расположен в акватории СМП), Эгвекино. Точной географической границы между администрациями не установлено, условно в западную часть акватории СМП входит четыре морских порта из двенадцати, в восточную ее часть — два морских порта из двенадцати. Постановлением Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» [28] была утверждена действующая редакция Правил.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главное управление Северного морского пути» (ФГБУ «ГлавСевморпуть») создано распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 июля 2022 г. № 2019-р [29] на основании Федерального закона от 28 июня 2022 г. № 184-ФЗ «О внесении изменений в ст. 5.1 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации и Федерального закона «О Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в целях организации плавания судов в акватории СМП. Дополнительно организовано обособленное структурное подразделение «Штаб морских операций» ФГБУ «ГлавСевморпуть». Таким образом, организационная и управляющая структура для обеспечения работы морской транспортной системы СМП полностью сформирована.

Международные схемы географического районирования Арктики

С 2017 г. вступил в действие Полярный кодекс (International Code for Ships Operating in Polar Waters — Polar Code) [30], разработанный ММО (ИМО) в 2014 г., который накладывает дополнительные конструктивные требования к судам, дополнительные требования к подготовке экипажей и экологические ограничения при плавании судов в полярных водах. Полярный кодекс рассматривает пространство Арктических морей Северного Ледовитого океана как единую акваторию в границах вод севернее 60° с. ш. с отклонениями, чтобы включить в него воды вокруг южной Гренландии,

исключить воды вокруг Исландии, материковой части Норвегии, Кольского полуострова России, Белого и Охотского морей и залива Принца Уильяма на Аляске. Схема границ полярных вод приведена на рис. 3 [30]. Подобные правила плавания в арктических морях действуют и в других странах, например, в Канаде это Canada Shipping Act (CSA) [31], 2001 г., Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards — TP 12259 [32], Navigation Safety Regulations SOR/2005–134 [33]; в Норвегии — Norwegian Maritime Code (1994) и Regulation № 23 On safety measures for ships operating in polar water (2016); в США — Shipping 46 U.S.C. [34].



Рис. 3. Границы полярных вод
в соответствии с Полярным кодексом [30]

Границы международного арктического научного сотрудничества, которые были определены во время встречи министров в Фэрбенксе 11 мая 2017 г. в рамках деятельности Арктического совета [35], приведены на рис. 4 [36]. Некоторые органы Арктического совета, такие как Арктическая программа мониторинга и оценки (АМАР), Рабочая группа по предотвращению чрезвычайных ситуаций, готовности и реагированию (ЕПРР), Сохранение арктической флоры и фауны (САФФ), имеют разные географические границы. При этом границы Северного Ледовитого океана, полярных вод и самого региона Арктики находятся в процессе постоянного обсуждения [37]. Следует отметить, что границы Полярных вод и международные разграничения Арктического совета также имеют преимущественно географический характер без четкой связи с арктическим судоходством, т. е., по своей сути, не являются транспортным районированием.

В работе [38] сделана попытка нового представления районов Арктики с точки зрения физических, географических и экологических характеристик (рис. 5). В частности, предложены различные альтернативные определения арктического региона (например, к северу от 66°33' с. ш., где наблюдаются полярная ночь и полярный день или регион, где средняя температура самого теплого месяца июля составляет 10 °С).

Согласно результатам исследований [39], арктическое судоходство занимает 57–80 % полярных вод, при этом включаются акватории и маршруты судов в летний период, когда происходит существенное таяние и очищение водной поверхности ото льда. В работе [40] на основе рассмотренных различных факторов, влияющих на судоходство в Арктике, сделан вывод о необходимости в будущем создания зон экологического контроля судоходства с целью обеспечения экологической безопасности, развития единообразия режимов правового и технического регулирования, выделения

чувствительных морских районов, применения многоцелевых принципов интегрированного управления судоходством и развития концепции морского пространственного планирования.



Рис. 4. Границы и разграничения научного международного сотрудничества в Арктике (иллюстрация с сайта <https://www.arctic.gov/maps/>)

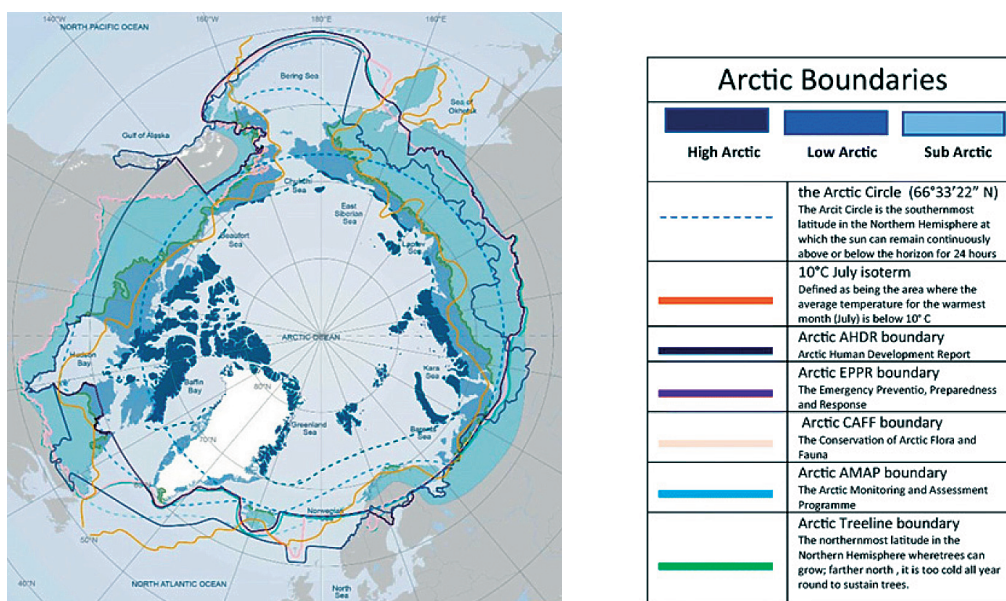


Рис. 5. Альтернативные схемы районирования Арктики (иллюстрация автора)

В качестве первого шага государствами — членами международного Арктического совета принята схема районов применения и ответственности арктических государств согласно «Соглашению об арктическом поиске и спасании от 2011 г.» (рис. 6). Данная схема районирования, также являясь географической, не учитывает фактора арктического судоходства. Предполагается, что каждая страна участник соглашения самостоятельно организует аварийно-спасательные работы в выделенных границах национальной ответственности, но при этом определяются варианты взаимодействия между странами. Например, Канада выделила 16 зон контроля безопасности (рис. 7) и на постоянной основе имплементирует различные положения Полярного кодекса в национальную юрисдикцию [41], при этом разрабатывая дополнительные Правила безопасности арктического судоходства и предотвращения загрязнений [42], [43].

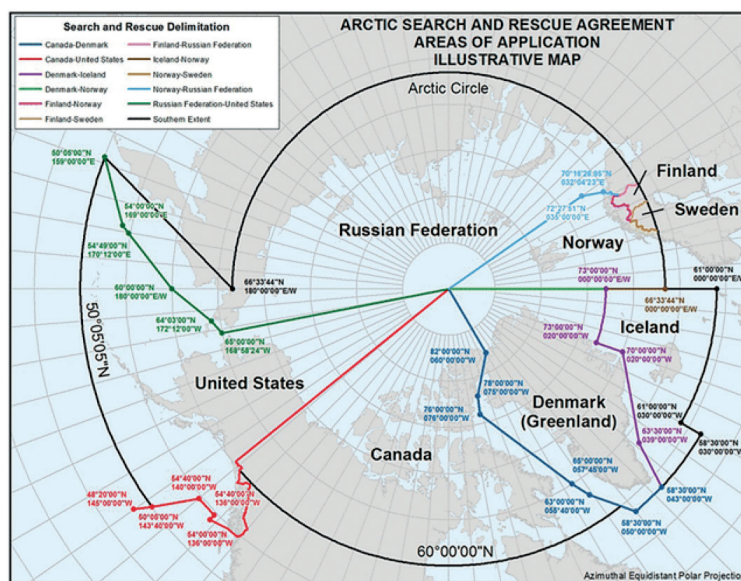


Рис. 6. Морские поисково-спасательные районы в Арктике [30], [40]

В 2020 г. современные российские Правила плавания в акватории Северного морского пути [28] установили границы 28 морских районов (рис. 8), что в 4 раза больше по сравнению с предыдущими Правилами 2013 г. [22]. Такое увеличение вызвано необходимостью перехода от большого пространственного категорирования ледовых условий к более мелкому, что позволяет более гибко составлять маршруты следования судов в зависимости от тяжести ледовых условий и ледового класса судна.

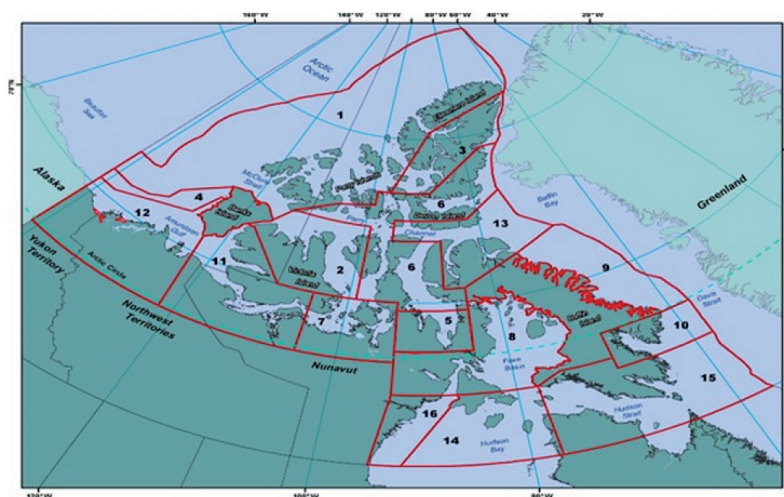


Рис. 7. Районы контроля безопасности Северо-Западного прохода (Канада) [42], [43]

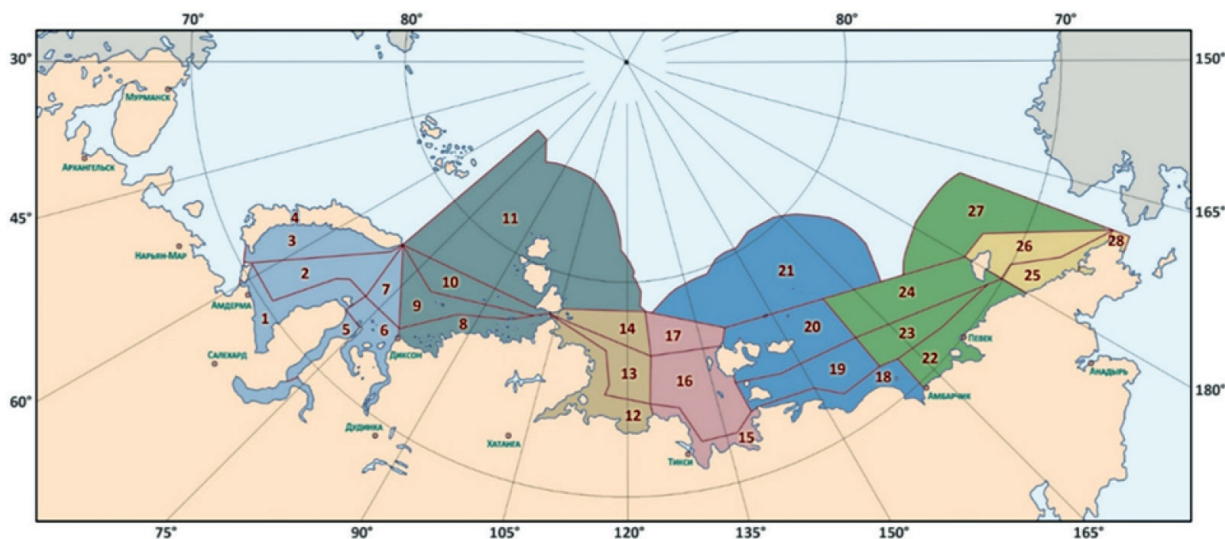


Рис. 8. Схема расположения районов акватории СМП [28]

Следует отметить, что у стран Арктического совета до сих пор не сформирован единый подход к таким задачам, как классификация льда (ледовой обстановки), и требованиям к конструкции судна (ледовому классу судна); большинство из них используют определения из Полярного кодекса, отдельные страны применяют собственные правила и классификацию. Российская Федерация, например, при выборе критериев допуска судов использует как национальную классификацию (Arc4-Arc9), так и шведско-финскую (балтийскую), при этом признавая ледовые классы судов согласно Международной ассоциации классификационных обществ [44].

В работах [45], [46] рассмотрены дополнительные факторы, определяющие навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства по СМП, такие как распределение глубин по морям, ледовые условия, влияние сезонности на формирование маршрутов судов, плотность судов, интенсивность судоходства и др. Данные критерии могут использоваться для уточнения границ районов СМП, развития моделей и методов районирования акваторий арктических морей Российской Федерации. В работе [47] рассмотрены различные методы географического совмещения различных выявленных областей Арктики, в том числе морских и прибрежных акваторий по критерию развития разработки и добычи природных ресурсов, движения морского и речного водного транспорта, охраняемых территорий с целью прогнозирования пространственного развития территорий, которые могут интенсифицироваться при потеплении климата. В работе [48] рассмотрены различные подходы к пространственной оценке морского транспорта и исследованы различные точки зрения по данному вопросу, включая создание карт-схем транспортных потоков, сетевой анализ, представление стратегий развития прибрежных территорий и местных социально-экономических детерминант. Предлагаемый подход отличается от классических описаний географии основных маршрутов и морских портов, в частности, ставится под сомнение традиционный подход к географии морского транспорта, и предлагается совмещение географического, логистического, социального и экономического подходов для районирования зон.

В процессе обобщения рассмотренных подходов к принципам построения географического и транспортного районирования акватории полярных вод было выявлено, что страны Арктического совета не имеют единообразного подхода по основным факторам, оказывающим влияние на судоходство в арктических морях). Это связано с тем, что в акватории шести из восьми стран Арктического совета судоходство имеет периодический характер (преимущественно в летний период по чистой воде). Результаты сравнения признаков наличия развитого транспортно-географического районирования в границах национальной акватории стран Арктического совета приведены в таблице.

Сравнение стран Арктического совета по наличию признаков развития транспортно-географического районирования и управления судоходством

Страна (член Арктического совета)	Наличие схем транспортного или географического районирования акватории	Наличие национальных Правил плавания в Полярных водах	Наличие отдельной морской арктической администрации	Наличие национальных требований к конструкции судна (ледовому классу судна)	Наличие национальной классификации льда (ледовой обстановки)
Дания	✗	✗	✗	✗	✗
Исландия	✗	✗	✗	✗	✗
Канада	✓	✓	✗	✓	✓
Норвегия	✗	✗	✗	✗	✓*
Россия	✓	✓	✓	✓	✓
США	✗	✓	✗	✓	✓
Финляндия	✗	✗	✗	✗	✓*
Швеция	✗	✗	✗	✗	✗

*Имеет научный характер, выполняется исследовательскими организациями и не имеет национального признания.

Условные обозначения: ✓ — наличие указанного признака в стране; ✗ — отсутствие.

Перспективы дальнейших исследований

Методы и модели, использование которых возможно для будущего перехода от географического к транспортному районированию СМП и акватории Полярных вод, в целом должны включать:

- качественное описание районов;
- количественное описание районов;
- описание связанности районов с объектами транспортной инфраструктуры;
- описание связанности районов с водными путями сообщения;
- возможность интерполяции данных (параметров) с географией района;
- возможность экстраполяции данных (параметров) с географией района (фактор времени);
- описание пространственных процессов;
- описание временных процессов;
- выявление связей пространственных и временных процессов;
- междисциплинарные подходы, в том числе социально-экономические;

Одна часть методов непосредственно связана с исследованием транспортных процессов (транспортного планирования), другая — с географическими процессами, которые могут быть исследованы как пространственные, временные или связанные. В зависимости от уровня агрегирования данных, характера допущений или сложности вычислений одновременно используются все три метода (географический, транспортный и междисциплинарный).

Заключение (Conclusion)

В процессе выполнения обзора рассмотрены основные схемы географического районирования морского пространства Арктики. Наибольшее развитие арктическое судоходство получило в Российской Федерации — Северный морской путь, чуть меньшее в Канаде — Северо-Западный проход. Остальные страны Арктического совета практически не имеют организационной структуры, национальных правил и требований по обеспечению безопасности судоходства, что связано с его низкой интенсивностью в настоящее время в пределах границ национальных акваторий. Для планового увеличения грузооборота по СМП в ближайшие годы только географического районирования будет недостаточно, поэтому необходима разработка научно обоснованных методов и моделей перехода к транспортному районированию морской арктической транспортной системы СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижков Ю. В. Северный морской путь в структуре арктической транспортной системы / Ю. В. Чижков // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 1 (68). — С. 27–32.
2. Миленина Э. А. Стратегия пространственного развития Арктической зоны // XIV Общероссийский форум «Стратегическое планирование в регионах и городах России», 19–20 октября 2015, Санкт-Петербург [Электронный ресурс] / Э. А. Миленина. — Режим доступа: <http://2015.forumstrategov.ru/upload/documents/Milenina.pdf> (дата обращения: 10.09.2023).
3. Каючкин Н. П. Географические основы транспортного освоения территории / Н. П. Каючкин. — Новосибирск: Наука, 2003. — 167 с.
4. Theocharis D. Arctic shipping: A systematic literature review of comparative studies / D. Theocharis, S. Pettit, V. S. Rodrigues, J. Haider // Journal of Transport Geography. — 2018. — Т. 69. — С. 112–128. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.04.010.
5. Положение о штабах морских операций на трассе Северного морского пути // Министерство морского флота СССР. — М.: АСМП, 1975. — 32 с.
6. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Адм. № 9501 / под ред. Г. С. Горшкова. — СПб.: ГУНиО, 1980. — 952 с.
7. Наставление для плавания по Северному морскому пути. — М.: Изд. ГУНИО МО СССР, 1966. — 129 с.
8. Постановление Совета министров СССР от 1 июня 1990 г. № 565 «О мерах по обеспечению выполнения Указа Президиума Верховного Совета СССР от 26 ноября 1984 г. «Об усилении охраны природы в районах крайнего севера и морских районах, прилегающих к северному побережью СССР» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=3426#uNB9AmTkDhoLXQX3> (дата обращения: 06.08.2023).
9. Конвенция ООН по морскому праву, 1982 год [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_r.pdf (дата обращения: 26.07.2023).
10. Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. — СПб.: Изд. ГУНИО МО РФ, 1995. — 415 с.
11. Чилингаров А. Н. Арктический регион: Проблемы международного сотрудничества: Хрестоматия в 3 томах / А. Н. Чилингаров; Под ред. И. С. Иванова. — М.: Аспект Пресс, 2013. — Т. 1. — 360 с.
12. Ананьев Д. А. История освоения Северного морского пути в освещении англо- и немецкоязычных исследователей / Д. А. Ананьев // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. — 2018. — № 3. — С. 5–14. DOI: 10.17238/issn2227-6564.2018.3.5.
13. Голдин В. И. Северный Морской Путь в арктической политике России: исторический опыт, современность и перспективы / В. И. Голдин // Россия XXI. — 2019. — № 1. — С. 32–57.
14. Карпов В. П. Проблемы преемственности в российской политике формирования Северного морского пути / В. П. Карпов // Северный морской путь, водные и сухопутные транспортные коридоры как основа развития Сибири и Арктики в XXI веке. Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. — С. 100–107.
15. Кузьминых А. К. Освоение северного морского пути во второй половине XX–начале XXI в. (Историко-географический обзор) / А. К. Кузьминых // Россия и Сибирь в изменяющемся мире: история и современность. Материалы всероссийской (с международным участием) научно-теоретической конференции. — Иркутск: Издательство «Репроцентр+», 2022. — С. 82–86.
16. Селин В. С. Проблемы законодательного регулирования в сфере развития Северного морского пути и Арктической зоны Российской Федерации / В. С. Селин // Аналитический вестник. — 2015. — № 6 (559). — С. 4–14.
17. Приложение 1. Материал Аналитического управления Аппарата Совета Федерации на тему «Арктика: актуальные экологические вопросы» // Аналитический вестник. — 2021. — № 21 (781). — С. 52–69.
18. Федеральный закон от 28.07.2012 N 132-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/70207760/> (дата обращения: 17.08.2023).
19. Границы океанов и морей. Адм. № 9031. — М.: ГУН и О, 2000. — 208 с.
20. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 15 марта 2013 года № 358-р «О создании федерального государственного казенного учреждения» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rulaws.ru/goverment/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-15.03.2013-N-358-r/> (дата обращения: 17.08.2023).

21. Акватория Северного морского пути: Официальный сайт Администрации Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsra.ru/> (дата обращения: 26.02.2022).
22. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 17.01.2013 № 7 «Правила плавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rg.ru/2013/04/19/pravila-dok.html> (дата обращения: 15.08.2023).
23. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года № 3120-р «План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/38714/> (дата обращения: 15.09.2023).
24. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 24.01.2022 № 17 «Об утверждении Правил ледокольной проводки судов в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202206010010> (дата обращения: 05.09.2023).
25. ФГБУ «Администрация Морских Портов Западной Арктики»: Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.marm.ru/> (дата обращения: 05.09.2023).
26. ФГБУ «Администрация морских портов Приморского края и Восточной Арктики»: Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://pma.ru/> (дата обращения: 05.09.2023).
27. Приказ Министерства транспорта РФ от 4 декабря 2013 г. № 373 «Об утверждении перечней морских портов, входящих в соответствующие администрации морских портов» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/70581512/> (дата обращения: 05.09.2023).
28. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/74664152/> (дата обращения: 06.09.2023).
29. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 23.07.2022 № 2019-р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208010008> (дата обращения: 07.09.2023).
30. International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/polar-code.aspx> (дата обращения: 09.09.2023).
31. Canada Shipping Act, 2001 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/c-10.15/> (дата обращения: 02.09.2023).
32. Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards — TP 12259 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tc.canada.ca/sites/default/files/migrated/tp12259e.pdf> (дата обращения: 02.09.2023).
33. Navigation Safety Regulations SOR/2005–134 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2005-134/index.html> (дата обращения: 02.09.2023).
34. 33 U.S.C. — Navigation and Navigable Waters [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.govinfo.gov/app/details/USCODE-2000-title33> (дата обращения: 05.09.2023).
35. Agreement on Enhancing International Arctic Scientific Cooperation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://hdl.handle.net/11374/1916> (дата обращения: 21.08.2023).
36. US Arctic Research Commission. MAPS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.arctic.gov/maps/> (дата обращения: 03.09.2023).
37. Østhagen A. The Arctic Ocean: Boundaries and Disputes / A. Østhagen, C. H. Schofield // The Arctic Yearbook. — University of the Arctic Thematic Network (TN) on Geopolitics and Security, 2021. — Pp. 5–22.
38. Karahalil M. Polar Code application areas in the Arctic / M. Karahalil, B. Ozsoy, O. Oktar // WMU Journal of Maritime Affairs. — 2020. — Vol. 19. — Is. 2. — Pp. 219–234. DOI: 10.1007/s13437-020-00200-4.
39. Eguíluz V. M. A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014 / V. M. Eguíluz, J. Fernández-Gracia, X. Irigoien, C. M. Duarte // Scientific reports. — 2016. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 30682. DOI: 10.1038/srep30682.
40. Brigham L. W. Arctic policy developments and marine transportation / L. W. Brigham // The Palgrave Handbook of Arctic Policy and Politics. — Cham: Springer International Publishing, 2019. — Pp. 393–408. DOI: 10.1007/978-3-030-20557-7_24.
41. Fraser D. A change in the ice regime: Polar code implementation in Canada / D. Fraser // Governance of Arctic Shipping: Rethinking Risk, Human Impacts and Regulation. — Springer Polar Sciences, 2020. — Pp. 285–300. DOI: 10.1007/978-3-030-44975-9_15.
42. TP 12259E — Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standard [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tc.canada.ca/en/marine-transportation/marine-safety/tp-12259e-arctic-ice-regime-shiping-system-airss-standard> (дата обращения: 12.09.2023).

43. Arctic Shipping Safety and Pollution Prevention Regulations (SOR/2017–286) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2017–286/index.html](https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2017-286/index.html) (дата обращения: 12.09.2023).

44. НД № 2–029901–002. Международная ассоциация классификационных обществ. Символика классификации судов: справ. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — 85 р.

45. 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.

46. Ольховик Е. О. Исследование влияния льда на формирование транспортных потоков в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Транспорт: наука, техника, управление: науч. информ. сб. — 2019. — № 6. — С. 14–18.

47. Eliasson K. Identification of development areas in a warming Arctic with respect to natural resources, transportation, protected areas, and geography / K. Eliasson, G. F. Ulfarsson, T. Valsson, S. M. Gardarsson // Futures. — 2017. — Vol. 85. — Pp. 14–29. DOI: 10.1016/j.futures.2016.11.005.

48. Ducruet C. The geography of maritime transport / C. Ducruet, J. Berli // International Encyclopedia of Transportation. — Elsevier, 2021. — Pp.517–534. DOI: 10.1016/B978-0-08-102671-7.10478-6.

REFERENCES

1. Chizhkov, Yu. V. “Northern Sea Route in the structure of Arctic transportation system.” *Transport of the Russian Federation* 1(68) (2017): 27–32.

2. Milenina, E. A. “Strategiya prostranstvennogo razvitiya Arkticheskoi zony.” *XIV Obshche-rossiiskii forum «Strategicheskoe planirovanie v regionakh i gorodakh Rossii»*. Web. 10 Sept. 2023 <<http://2015.forumstrategov.ru/upload/documents/Milenina.pdf>>.

3. Kayuchkin, N. P. *Geograficheskie osnovy transportnogo osvoeniya territorii*. Novosibirsk: Nauka, 2003.

4. Theocharis, Dimitrios, Stephen Pettit, Vasco Sanchez Rodrigues, and Jane Haider. “Arctic shipping: A systematic literature review of comparative studies.” *Journal of Transport Geography* 69 (2018): 112–128. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.04.010.

5. *Polozhenie o shtabakh morskikh operatsii na trasse Severnogo morskogo puti*. M.: ASMP, 1975.

6. Gorshkov, G. S., ed. *Atlas okeanov. Severnyi Ledovityi okean. Adm. № 9501*. SPb.: GUN i O, 1980.

7. *Nastavlenie dlya plavaniya po Severnomu morskому puti*. M.: Izd. GUNIO MO SSSR, 1966.

8. Postanovlenie Soveta ministrov SSSR ot 1 iyunya 1990 g. № 565 «O merakh po obespecheniyu vypolneniya Ukaza Prezidiuma Verkhovnogo Soveta SSSR OT 26 noyabrya 1984 G. «Ob usilenii okhrany prirody v raionakh krainego severa i morskikh raionakh, prilegayushchikh k severnomu poberezh'yu SSSR». Web. 6 Aug. 2023 <<https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=3426#uNB9AmTkDhoLXQX3>>.

9. Konventsia OON po morskому pravu, 1982 god. Web. 26 July 2023 <https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_r.pdf>.

10. *Rukovodstvo dlya skvoznoy plavaniya sudov po Severnomu morskому puti*. SPb.: Izd. GUNIO MO RF, 1995.

11. Chilingarov, A. N. *Arkticheskii region: Problemy mezhdunarodnogo sotrudnichestva*. Vol. 1. M.: Aspekt Press, 2013.

12. Anan'ev, D. A. “The history of the development of the northern sea route as presented in English- and German-language historiography.” *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series “Humanitarian and Social Sciences”* 3 (2018): 5–14. DOI: 10.17238/issn2227-6564.2018.3.5.

13. Goldin, V. I. “Severnyi Morskoi Put' v arkticheskoi politike Rossii: istoricheskii opyt, sovremennost' i perspektivy.” *Rossiya XXI* 1 (2019): 32–57.

14. Karpov, V. P. “Problemy preemstvennosti v rossiiskoi politike formirovaniya Severnogo morskogo puti.” *Severnyi morskoi put', vodnye i sukhoputnye transportnye koridory kak osnova razvitiya Sibiri i Arktiki v XXI veke. Cbornik dokladov XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Tyumen': Tyumenskii industrial'nyi universitet, 2018. 100–107.

15. Kuzminykh, A. “Development of the northern sea route in the second half of the XX–XXI centuries. Historiographical review.” *Rossiya i Sibir' v izmenyayushchemsya mire: istoriya i sovremennost'. Materialy vs Rossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-teoreticheskoi konferentsii*. Irkutsk: Izdatel'stvo «Reprintsentr+», 2022. 82–86.

16. Selin, V. S. “Problemy zakonodatel’nogo regulirovaniya v sfere razvitiya Severnogo morskogo puti i Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii.” *Analiticheskii vestnik* 6(559) (2015): 4–14.
17. “Prilozhenie 1. Material Analiticheskogo upravleniya Apparata Soveta Federatsii na temu «Arktika: aktual’nye ekologicheskie voprosy».” *Analiticheskii vestnik* 21(781) (2021): 52–69.
18. Federal’nyi zakon ot 28.07.2012 N 132-FZ «O vnesenii izmenenii v otдел’nye zakonodatel’nye akty Rossiiskoi Federatsii v chasti gosudarstvennogo regulirovaniya torgovogo moreplavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti». Web. 17 Aug. 2023 <<http://base.garant.ru/70207760/>>.
19. *Granitsy okeanov i morei. Adm. № 9031*. M.: GUN i O, 2000.
20. Rasporyazhenie Pravitel’sva Rossiiskoi Federatsii ot 15 marta 2013 goda № 358-r «O sozdanii federal’nogo gosudarstvennogo kazennogo uchrezhdeniya». Web. 17 Aug. 2023 <<https://rulings.ru/government/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-15.03.2013-N-358-r/>>.
21. Akvatoriya Severnogo morskogo puti: Ofitsial’nyi sait Administratsii Severnogo morskogo puti. Web. 26 Feb. 2022 <<http://www.nsra.ru/>>.
22. Prikaz Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii ot 17.01.2013 № 7 «Pravila plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti». Web. 15 Aug. 2023 <<https://rg.ru/2013/04/19/pravila-dok.html>>.
23. Rasporyazhenie Pravitel’sva Rossiiskoi Federatsii ot 21 dekabrya 2019 goda № 3120-r «Plan razvitiya infrastruktury Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda». Web. 15 Aug. 2023 <<http://government.ru/docs/38714/>>.
24. Prikaz Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii ot 24.01.2022 № 17 «Ob utverzhdenii Pravil ledokol’noi provodki sudov v akvatorii Severnogo morskogo puti». Web. 5 Sept. 2023 <<http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202206010010>>.
25. FGBU «Administratsiya Morskikh Portov Zapadnoi Arktiki»: Ofitsial’nyi sait. Web. 5 Sept. 2023 <<https://www.mapm.ru/>>.
26. FGBU «Administratsiya morskikh portov Primorskogo kraia i Vostochnoi Arktiki»: Ofitsial’nyi sait. Web. 5 Sept. 2023 <<https://pma.ru/>>.
27. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 4 dekabrya 2013 g. № 373 «Ob utverzhdenii perechnei morskikh portov, vkhodyashchikh v sootvetstvuyushchie administratsii morskikh portov». Web. 5 Sept. 2023 <<https://base.garant.ru/70581512/>>.
28. Postanovlenie Pravitel’sva RF ot 18 sentyabrya 2020 g. № 1487 «Ob utverzhdenii Pravil plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti». Web. 6 Sept. 2023 <<https://base.garant.ru/74664152/>>.
29. Rasporyazhenie Pravitel’sva Rossiiskoi Federatsii ot 23.07.2022 № 2019-r. Web. 7 Sept. 2023 <<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208010008>>.
30. International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code). Web. 9 Sept. 2023 <<https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/polar-code.aspx>>.
31. Canada Shipping Act, 2001. Web. 2 Sept. 2023 <<https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/c-10.15/>>.
32. Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards — TP 12259. Web. 2 Sept. 2023 <<https://tc.canada.ca/sites/default/files/migrated/tp12259e.pdf>>.
33. Navigation Safety Regulations SOR/2005–134. Web. 2 Sept. 2023 <<https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2005-134/index.html>>.
34. 33 U.S.C. — Navigation and Navigable Waters. Web. 5 Sept. 2023 <<https://www.govinfo.gov/app/details/USCODE-2000-title33>>.
35. Agreement on Enhancing International Arctic Scientific Cooperation. Web. 21 Aug. 2023 <<http://hdl.handle.net/11374/1916>>.
36. US Arctic Research Commission. MAPS. Web. 3 Sept. 2023 <<https://www.arctic.gov/maps/>>.
37. Østhagen, Andreas, and Clive H. Schofield. “The Arctic Ocean: Boundaries and Disputes.” *The Arctic Yearbook*. University of the Arctic Thematic Network (TN) on Geopolitics and Security, 2021. 5–22.
38. Karahalil, Meric, Burcu Ozsoy, and Ozgun Oktar. “Polar Code application areas in the Arctic.” *WMU Journal of Maritime Affairs* 19.2 (2020): 219–234. DOI: 10.1007/s13437-020-00200-4.
39. Eguíluz, Victor M., Juan Fernández-Gracia, Xabier Irigoien, and Carlos M. Duarte. “A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014.” *Scientific reports* 6.1 (2016): 30682. DOI: 10.1038/srep30682.
40. Brigham, Lawson W. “Arctic policy developments and marine transportation.” *The Palgrave Handbook of Arctic Policy and Politics*. Cham: Springer International Publishing, 2019. 393–408. DOI: 10.1007/978-3-030-20557-7_24.
41. Fraser, Drummond. “A change in the ice regime: Polar code implementation in Canada.” *Governance of Arctic Shipping: Rethinking Risk, Human Impacts and Regulation*. Springer Polar Sciences, 2020. 285–300. DOI: 10.1007/978-3-030-44975-9_15.

42. TP 12259E — Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standard. Web. 12 Sept. 2023 <<https://tc.canada.ca/en/marine-transportation/marine-safety/tp-12259e-arctic-ice-regime-shipping-system-airss-standard>>.
43. Arctic Shipping Safety and Pollution Prevention Regulations (SOR/2017–286). Web. 12 Sept. 2023 <[https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2017–286/index.html](https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2017-286/index.html)>.
44. *Mezhdunarodnaya assotsiatsiya klassifikatsionnykh obshchestv. Simvolika klassifikatsii sudov. Spravochnik*. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2015.
45. 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.
46. Olkhovik, E. O. "Research of the influence of ice on the formation of transport flows in the aquatic area of the Northern Sea Route." *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)* 6 (2019): 14–18.
47. Eliasson, Kjartan, Gudmundur F. Ulfarsson, Trausti Valsson, and Sigurdur M. Gardarsson. "Identification of development areas in a warming Arctic with respect to natural resources, transportation, protected areas, and geography." *Futures* 85 (2017): 14–29. DOI: 10.1016/j.futures.2016.11.005.
48. Ducruet, César, and Justin Berli. "The geography of maritime transport." *International Encyclopedia of Transportation*. Elsevier, 2021. 517–534. DOI: 10.1016/B978-0-08-102671-7.10478-6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Киджи Диана Сергеевна —
старший помощник капитана
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
ФГУП «Атомфлот»
183038, Российская Федерация, Мурманская обл.,
г. о. город Мурманск, тер. Мурманск-17, д. 1
e-mail: dkidzhi@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kidzhi, Diana S. —
Chief Officer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
FSUE Atomflot
1 Murmansk-17 Area, Murmansk, 183038,
Russian Federation
e-mail: dkidzhi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2023 г.
Received: September 22, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-783-797

SOME ISSUES OF SURVEYING FLOATING BERTHS OF YACHT MARINAS

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

¹ — Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet,
St. Petersburg, Russian Federation

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

Over the past 20 years, in Russia the growth of small-sized fleet, which is self-propelled watercraft with a length of 2 to 24 m, intended for sports, recreation, sailing trips and cruises, is noted. The increase in the number of vessels, in turn, contributes to the construction and commissioning of small-sized fleet anchorages. The approved terminology relating to yacht infrastructure is considered and its problems are discussed. A generalized diagram of the yacht port composition is proposed. The object of this study is water transport, in particular the location of small-sized fleet. The purpose of this study is to identify and formulate problems that may be encountered during the inspection and operation of hydraulic structures containing floating pontoons intended for mooring small-sized fleets using the example of a specific yacht port. The use of the principles embedded in ESG technology as one of the ways aimed at harmonizing regulations in the creation and operation of yacht marinas is proposed. As part of the ongoing survey of the yacht port, the berth structures of the yacht port were decomposed element by element and workable and limiting indicators of the pontoon berths elements condition were proposed in tabular form. These indicators are not exhaustive and must be adjusted for the specific object of inspection, taking into account the requirements of the Customer, regulations and the design of the hydraulic structure. In conclusion, a number of questions for further research are formulated. It is concluded that an adequate assessment of the technical condition of floating berths based on the results of a visual inspection is possible with the proper organization of an expert service in combination with continuous deformation monitoring and timely repairs carried out by the operating organization.

Keywords: yacht tourism, inland waterway transport infrastructure, ensuring safe operation, monitoring of technical condition.

For citation:

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 admiral S. O. Makarova* 15.5 (2023): 783–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-783-797.

УДК 656.628

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПЛАВУЧИХ ПРИЧАЛОВ ЯХТЕННЫХ МАРИН

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

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

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

Увеличение в течение последних 20 лет числа судов маломерного флота, предназначенных для занятия спортом, отдыха, прогулок и круизов, способствует строительству и введению в эксплуатацию стоянок маломерного флота. Рассмотрена действующая терминология, касающаяся яхтенной инфраструктуры, сформулированы проблемы, возникающие при обследовании гидротехнических сооружений. Предложена обобщенная схема инфраструктурного состава яхтенного порта. Объектом данного исследования является водный транспорт, в частности места базирования маломерного флота. Целью данного исследования является формулирование на примере конкретного яхтенного порта некоторых проблем, связанных с техническим и нормативно-правовым регулированием, возникающих в процессе обследования и во время эксплуатации гидротехнических сооружений, содержащих плавучие понтоны, предназначенные для швартовки маломерного флота. Предлагается использование принципов, заложенных в ESG-технологии как один из путей, направленных на гармонизацию нормативно-правовых актов при создании и эксплуатации яхтен-

ных марин. В рамках проведенного обследования яхтенного порта были поэлементно декомпозированы его причальные сооружения и предложены в табличном виде работоспособные и предельные показатели состояния элементов понтонных причалов. Отмечается, что данные показатели не являются исчерпывающими и должны быть скорректированы под конкретный объект обследования с учетом требований заказчика, нормативно-правовых актов и конструкции гидротехнического сооружения. В работе сформулирован ряд вопросов для дальнейших исследований. Сделан вывод о том, что адекватная оценка технического состояния плавучих причалов по результатам визуального обследования возможна при должной организации экспертной службы в сочетании с непрерывным деформационным мониторингом и своевременными ремонтами, проводимыми эксплуатирующей организацией.

Ключевые слова: яхтенный туризм, яхтенная марина, инфраструктура, внутренний водный транспорт, плавучий понтон, причальные линии, мониторинг технического состояния, обследование.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Пропускная способность водных путей существенно выше пропускной способности перегруженных автомобильных и железных дорог в отличие от изнашиваемости и стоимости подвижного состава. Например, существует мнение, что для прибрежного плавания по Финскому заливу и маршрутного судоходства по Неве в пределах Санкт-Петербурга перспективным направлением является использование маломерного флота. В наиболее развитых экономически странах процесс движения автомобильного транспорта ограничивается местными администрациями, а внутренний водный транспорт имеет государственную поддержку [1], [2]. Фактически все суда водоизмещением менее 80 т и осадкой 0,5–2,5 м являются некоммерческими. Рост числа судов, в свою очередь, обуславливает строительство и введение в эксплуатацию соответствующей инфраструктуры. Стоянки маломерного флота представляют собой комплекс инженерных объектов, основным звеном которого являются гидротехнические сооружения.

Геоэкологические проблемы инфраструктуры портов и водно-транспортных сооружений требуют не только технически сложной и дорогостоящей ревитализации яхтенных портов (марин), но и могут представлять экологические проблемы для окружающей среды. В идеале гидротехнический объект должен быть спроектирован и построен таким образом, чтобы он мог органически вписаться в природную среду, способствуя формированию жизнеспособной природно-технической системы.

С появлением маломерного флота в Российской Федерации связано появление неофициальных терминов:

- *яхтенная стоянка* — комплекс объектов для безопасного причаливания и стоянки яхт;
- *яхтенный порт (марина)* — комплекс объектов и средств для безопасного причаливания и длительной стоянки яхт, включающий береговые здания и сооружения, а также гидротехнические сооружения;
- *яхтинг* — сфера досуга, включающая водно-парусный спорт и яхтенный туризм.

До 2017 г. Российское законодательство не содержало определения термина «яхта» [1], [2], но в ГОСТе¹ введено следующее определение: «*яхтой является судно (любой длины независимо от использования), используемое для спорта или отдыха и коммерческой эксплуатации, длиной 24 м и более, которое может перевести до двенадцати пассажиров*». Аналогичное определение приведено в ГОСТе Р 57617–2017² для малого судна. Несколько иное определение дано в Руководстве³, где

¹ ГОСТ Р ИСО 21406–2022 «Туризм и сопутствующие услуги. Яхтенные порты (марины). Специальные требования к яхтенным портам (маринам) класса люкс». Введ. 30.06.2023.

² ГОСТ Р 57617–2017. Национальный стандарт Российской Федерации «Объекты отдыха, развлечения, культуры и спорта на открытой водной поверхности и их инфраструктура. Термины и определения». Введ. 01.01.2018.

³ Руководство по классификации и освидетельствованию яхт НД № 2-030101-041, Российский морской регистр судоходства, 2021. СПб.: РМРС, 2021.

отмечается, что «яхта — палубное самоходное судно, исключая гребные суда, предназначенное для водных прогулок с проживанием на воде и имеющее закрытые помещения, предназначенные для размещения всех лиц, предусмотренных к нахождению на судне».

Развитие яхтинга и яхтенного спорта — важная задача, которая касается не только туризма, но и создания спортивных парусных школ, развития водных видов спорта, а также круизного сообщения. В России к центрам яхтенного туризма относятся Краснодарский край, Республика Крым и Севастополь, ряд приволжских городов, Москва, Санкт-Петербург, Приморский край. Отдых на воде с использованием яхт популярен в регионах, расположенных на побережье Волги, в Республике Татарстан, Пермском и Приморском краях, Ростовской, Ленинградской, Архангельской и Калининградской областях.

Объектом данного исследования является водный транспорт, в частности места базирования маломерного флота, а его целью — выявление и формулирование на примере конкретного яхтенного порта проблем, возникающих при обследовании и эксплуатации гидротехнических сооружений, содержащих плавучие понтоны, предназначенные для швартовки маломерного флота.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Начиная с августа 2017 г., в соответствии с приказами Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, утверждены следующие национальные стандарты Российской Федерации: ГОСТ Р 70214–2022 «Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения»; ГОСТ Р 57617–2017 «Объекты отдыха, развлечения, культуры и спорта на открытой водной поверхности и их инфраструктура. Термины и определения»; ГОСТ Р 57618.1–2017 «Инфраструктура маломерного флота. Общие положения»; ГОСТ Р 57618.2–2017 «Инфраструктура маломерного флота. Яхтенные порты. Общие требования»; ГОСТ Р 57618.3–2017 «Инфраструктура маломерного флота. Яхтенные порты. Эксплуатация. Требования безопасности»; ГОСТ Р 57618.4–2017 «Инфраструктура маломерного флота. Ремонтные базы и сервисы. Общие требования»; ГОСТ Р 58741–2019 «Причалные сооружения малого флота. Общие положения»; ГОСТ Р 58742–2019 «Причалные сооружения малого флота. Требования функциональной безопасности»; ГОСТ Р 58737–2019 «Места отдыха на водных объектах. Общие положения», в соответствии с которыми на рис. 1 приведена структура яхтенного порта.

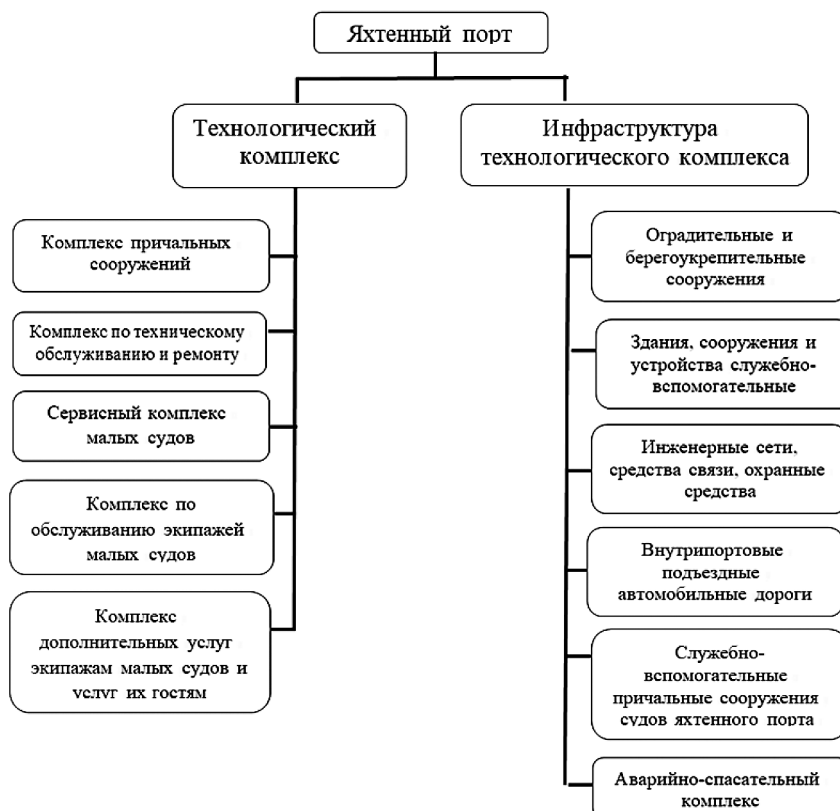


Рис. 1. Функциональная схема яхтенного порта

Яхтенный туризм, являясь составной частью как транспортного, так и туристического комплекса территории, должен развиваться опережающими темпами с целью содействия дальнейшему преобразованию его в центр туризма, отдыха и санаторно-курортного оздоровления. Эти и другие факторы способствовали утверждению концепции развития яхтенного туризма на период до 2030 года¹. Реализация концепции позволит повысить инвестиционную привлекательность отрасли, привлечь новые кадры, создать новые локации и условия в России для увлекающихся яхтингом туристов.

Проблемы обеспечения сохранности объектов на стадии эксплуатации или обоснования необходимости строительства на стадии проектирования могут быть успешно решены с использованием методов системного анализа. Наличие проблемы является показателем неудовлетворительной системности какого-либо процесса. В настоящее время приоритетность инвестирования строительных объектов, а также производство и технология работ на них часто определяются ненаучными критериями. Для минимизации возможности подобного подхода важно использовать научно обоснованную методику принятия технического решения на основе весомости, так как мера значимости объекта определяется его ценностью.

В мире существует значительный опыт проектирования яхтенных портов [3]–[6] и предложены критерии для оценки уровня инфраструктуры яхтенного порта [7]. При этом необходимо отметить большое разнообразие нормативных документов, иногда существенно различающихся в зависимости от стран и естественных условий на месте строительства. Многие яхтенные порты в качестве причальных гидротехнических сооружений используют плавучие понтоны [8]–[10], представляющие собой плавучие причалы (модули), позволяющие использовать их в качестве как отдельного причала, так и компоновать их различные формы в зависимости от размеров акватории и количества швартующихся маломерных судов.

Тип понтонов — стоечный плавучий причальный понтон с корпусом безнаборной конструкции, при которой наружная обшивка, настил палубы и поперечные переборки выполнены из железобетона. Форма корпуса — прямоугольный параллелепипед без подъема днища в оконечностях. Причем понтоны могут быть выполнены не только из железобетона, но и из иных материалов. Кроме того, следует обратить внимание на то, что в настоящее время понтонные плавучие причалы классифицируются и как гидротехническое сооружение, и как стоечное судно. По отношению к перевозкам суда подразделяют на транспортные, нетранспортные и стоечные. Основную группу судов морского и речного флота составляют *транспортные суда*, предназначенные для перевозки грузов и пассажиров. *Нетранспортные суда* служат для обеспечения их бесперебойной и безаварийной работы. Особую группу образуют *суда стоечного флота* (дебаркадеры и брандвахты), используемые в качестве пристаней, плавучих причалов, гостиниц, общежитий, складов, яхт-клубов и т. п.

В соответствии с действующими международными нормами плавучий причал определяется как плавучий объект, установленный у берега или на рейде на внутреннем водном пути, имеющий устройства для безопасного подхода судов и предназначенный для безопасной стоянки судов, их загрузки, разгрузки и обслуживания, а также посадки пассажиров на суда и высадки их с судов. Схема раскрепления принимается в соответствии с паспортными данными по типам железобетонных понтонов. План и конструктивный разрез по одному из плавучих причалов показан на рис. 2. На каждый причал или причальное сооружение должен быть составлен паспорт гидротехнического сооружения и декларация соответствия.

Срок службы плавучих сооружений (понтон — 25 лет) предполагает по мере износа несущих конструкций более чем на 75% замену отдельных железобетонных понтонов сертифицированными с гарантией 25 лет. Широкое использование плавучих и плавуче-стоечных причалов для формирования причального фронта марин обусловлено минимальным воздействием этих сооружений на природную среду — ненарушение вдольбереговых течений и движения наносов, отсутствие негативного воздействия на фауну и биоты.

¹ Распоряжение Правительства РФ от 14.10.2021 № 2897-р (ред. от 13.10.2022) «Об утверждении Концепции развития яхтенного туризма в Российской Федерации на период до 2030 года».

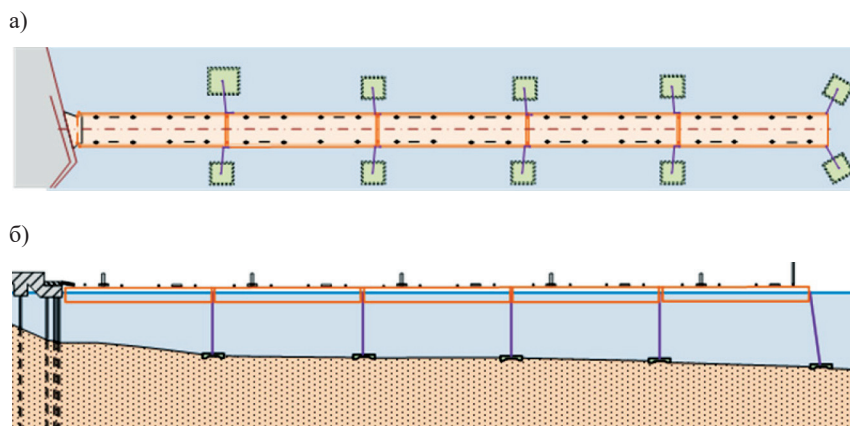


Рис. 2. Плавучий причал: а — вид сверху; б — разрез

Методологической основой освидетельствования причальных гидротехнических сооружений является синтез знаний: исследование целого через свойства его составляющих, объединение разных элементов в единое целое с целью создания нового, познание объекта как единого целого в совокупности и взаимосвязи его частей. Исключительное значение для создания и функционирования портовых ГТС имеет их инженерно-конструктивная целостность, определяющая внутреннее содержание и строение и отражающая особенности сооружения как единой системы «основание – фундамент – сооружение». При этом следует отметить важнейшую роль организации непрерывного мониторинга технического состояния всех элементов конструкции [11], [12].

В соответствии с действующими нормативными документами (Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г., № 184-ФЗ, ГОСТ Р 54523–2011 «Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», ГОСТ Р 55561–2013 «Внутренний водный транспорт. Портовые гидротехнические сооружения. Требования безопасности, СП 13–102–2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений») причалы подлежат регулярным обследованиям и экспертизе эксплуатационной надежности. Обследование наиболее ответственного элемента сооружения предусматривает контроль перемещений и деформаций как всего сооружения, так и отдельных его частей (элементов).

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Комплексные обследования большого количества плавучих причальных сооружений выявили отсутствие в ГОСТе Р 54523–2011 некоторых важных для практики методик освидетельствования и оценки плавучих объектов. В связи с этим в продолжение основной части данного ГОСТа был разработан и утвержден СТО НОСТРОЙ 2.30.155–2014¹.

Работы по комплексному обследованию сооружения, согласно ГОСТу Р 54523–2011, проводятся в три взаимосвязанных этапа:

- подготовительные (рекогносцировочные) работы;
- органолептический (визуальный) осмотр;
- детальные (инструментальные) исследования для верификации происходящих физических процессов.

Органолептическое (визуальное) обследование объектов причала позволяет выявить те повреждения конструкций и сооружений, которые могут вызвать аварию и разрушение элементов сооружений. Прогноз и оценка риска аварии объекта осуществляются на основе аналитической системы, сочетающей математические методы и информационные технологии с опытом и знаниями экспертов, выполняющих обследование.

¹ СТО НОСТРОЙ 2.30.155–2014 «Правила проведения обследования и мониторинга режима эксплуатации и технического состояния плавучих сооружений и их систем удержания». М.: ЗАО «Учебно-научный центр «Перспектива», 2018. 96 с.

В рамках разработки аналитической системы основной функцией эксперта является предоставление формализованной информации о техническом состоянии несущего каркаса объекта, что требует от него владения методами анализа технических состояний несущих конструкций и методом принятия технических решений в условиях неопределенности. В то же время развитие систем мониторинга технического состояния причалов может определять корректность исследований, а визуальное обследование в комплексе с использованием информационных технологий является базой современных технологий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию объекта. Мероприятия по проведению визуального осмотра должны проводиться только специализированными организациями, имеющими лицензию на разработку экспертных заключений или экспертов с подтвержденными знаниями в данной области.

Органолептический подход при обследовании сооружения имеет следующие достоинства: он малозатратен и не требует применения дорогостоящего измерительного оборудования и инструментов. Инструментальные методы в большинстве случаев играют вспомогательную роль — они предназначены для получения исходных данных, необходимых для выполнения верификационных расчетов сооружения.

Среди важнейших работ с использованием средств измерений следует выделить геодезический мониторинг геометрических параметров сооружения и измерения уровня воды в пьезометрах. Анализ отклонения этих параметров от критических значений позволяет оперативно ликвидировать аварийную ситуацию. Учитывая, что деформации являются интегральным показателем изменения технического состояния практически любого сооружения, принципиально важным для причалов является измерение планового смещения деформационных марок, установленных на сооружении. Приведенные методики имеют один общий недостаток: получаемые в ходе работ данные характеризуют состояние объекта в отдельных точках, которые могут отстоять друг от друга на значительные расстояния, не отражая техническое состояние всего объекта.

Анализ существующих нормативных документов и опыт проведения комплексных обследований выявил недостатки существующих рекомендаций применительно к яхтенным портам, обусловленные их конструктивными и функциональными особенностями. Рассмотрим данный вопрос на примере паспортизации гидротехнических сооружений яхтенного порта Royal Yacht Club (рис. 3), который является комплексом инженерных сооружений и технических объектов, обеспечивающих стоянку и использование яхт и катеров для активного отдыха, спорта и развлечений.

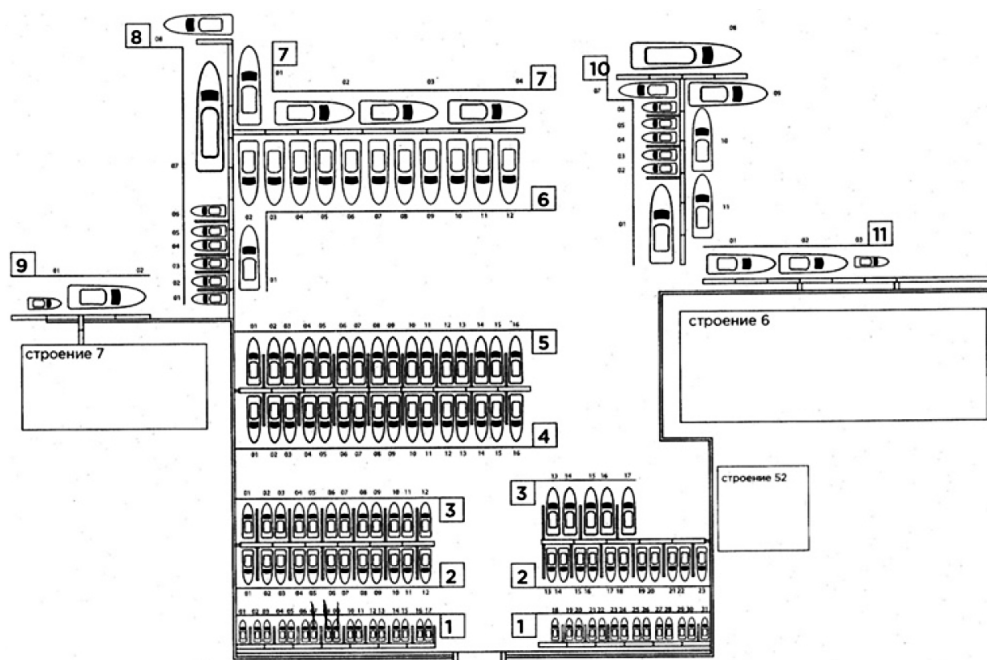


Рис. 3. Схема яхт-клуба Royal Yacht Club:
1–11 — причальные линии

Задачами, решаемыми данным яхтенным портом, являются: обеспечение летней стоянки на воде и использование катеров и яхт (7–30 м, осадка до 2,5 м) — 100–120 судов; прием гостевых катеров и яхт; снабжение катеров и яхт на стоянке электроэнергией и водой; помощь в подготовке судов к плаванию, доставка продуктов и т. п.; оказание первой медицинской помощи экипажам и гостям; обслуживание судов в навигационный период (минимально необходимый сервис); информационное обеспечение экипажей судов; оказание боцманской помощи судам яхт-клуба на воде; оказание помощи владельцам базирующихся в клубе судов в организации подъема / спуска, зимнего хранения и ремонта судов.

Причальный фронт яхтенного порта представляет собой восемь линий плавучих понтонов со швартовными пальцами (рис. 4, а) и плавуче-стоечного эстакадного причала (линия 11 на рис. 3) — рис. 4, б.

а)



б)



Рис. 4. Типы причальных сооружений яхт-клуба Royal Yacht Club:
а — плавучий причал со швартовными пальцами; б — плавуче-стоечный причал

Для обеспечения доступа к причальным сооружениям используются сходни $1,2 \times 6$ (11 шт.), закрепленные на береговых опорах. План расстановки судов на акватории учитывает требования Правил пожарной безопасности на судах внутреннего водного транспорта РФ в части требований к судам, находящимся в базах отстоя.

Расстояние между причальными линиями обеспечивает безопасность судоходства и рассчитано с учетом расстановки судов кормой к пирсам. Причальные линии 1–3 (см. рис. 3) закреплены в поперечном направлении при помощи мертвых якорей. Концевые понтоны всех линий закреплены при помощи цепей со специальными береговыми опорами. Противоположные торцы линий прикреплены к мертвым якорям. Линия 4 закреплена в поперечном направлении на мертвых якорях и сваях. Конструктивно причальные линии 1–4 и 9 состоят из плавучих понтонов размером 12×2 м, соединенных между собой транцами. Конструктивно понтоны представляют собой металлическую раму с деревянным настилом, к которой прикреплены буи, изготовленные из специального морозостойкого полиэтилена и заполненные пенополиуретаном, что позволяет оставлять причальные сооружения на воде в зимний период. Для размещения вспомогательного флота и прочих хозяйственных целей предназначена линия 9. К понтонам прикреплены причальные (швартовные пальцы) нескольких типоразмеров и конструкций.

Причальные линии 6–8 и 10 выдаются от береговой линии в сторону судового хода, образуя волноломы. Данные линии представляют собой сцепку понтонов марки Marinetek модели M2712HD размером $11,92 \times 2,7$ м из водонепроницаемого фибробетона, а сердцевина наполнена пенополистеролом. Сварные петли и стальные детали изготовлены из стали горячей гальванической обработки. Привальный брус — сосна, пропитанная под давлением, или другое дерево твердых пород.

Судоподъемное сооружение (рис. 5) состоит из судоподъемной эстакады и подъездных путей. Эстакада включает две колеи, симметричные относительно продольной оси сооружения. Эстакада состоит из свайного основания и верхнего строения. Свайное основание выполнено из стальных труб с подкосами для обеспечения поперечной устойчивости. Верхнее строение эстакады включает несущую и проезжую части. Несущая часть пролетного строения каждой колеи состоит из трех прогонов. Проезжая часть пролетного строения выполнена из швеллеров, приваренных к прогонам. Подъездные пути выполнены из плит, уложенных на подушку.



Рис. 5. Судоподъемное сооружение «Кран ВНТ-100» с приводом на четыре колеса

Берегоукрепление. Подпорная бетонная стенка (A–C) перед трибунами Водного стадиона, расположенного по адресу: г. Москва, Ленинградское шоссе, 39, представляет собой низкий свайный ростверк с бетонной надстройкой. Левая часть ковша гавани (вид с водохранилища) образована открылком подпорной бетонной стенки (A–B–C), переходящей в берегоукрепление (C–D–E–F–G–H) — рис. 6.

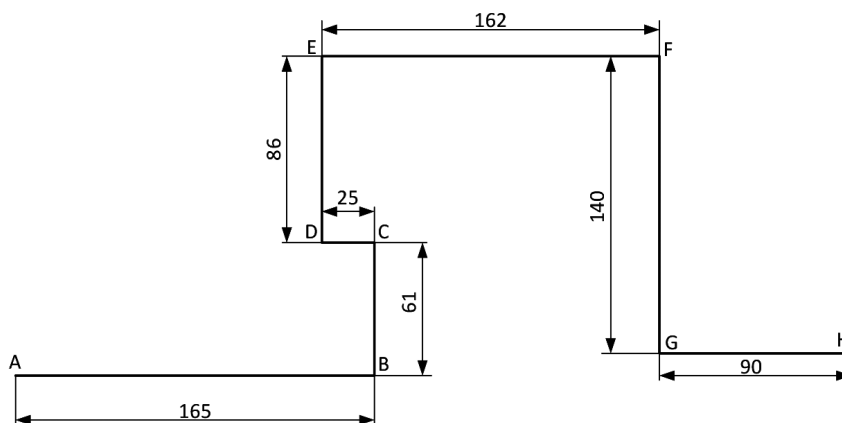


Рис. 6. План расположения берегоукрепления яхтенного порта Azimut Moscow Royal Yacht Club

Берег ковша укреплен подпорной стенкой из свай, связанных между собой обвязкой из швеллера и железобетонных плит заборки. Лицевая стенка двумя анкерными тягами из двутавра связана с рядом анкерных свай из двутавра. Шапочный брус подпорной стенки изготовлен из швеллеров № 12. Поверху берегоукрепления устроен променад с настилом из досок (рис. 7).

На основе результатов выполненного комплексного обследования сделан вывод о том, что гидротехнические сооружения яхтенного порта представляет собой сложную природно-техническую систему, спроектированную таким образом, чтобы при сравнительно малых затратах на строительство оказывать минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду.



Рис. 7. Пешеходная эстакада (променад)
поверху берегоукрепления

Конфигурация и состав причального фронта в зависимости от конъюнктуры туристических услуг могут видоизменяться в течение короткого промежутка времени. При этом наряду с причальными сооружениями для обеспечения безопасности плавания большое значение играют акватория порта, поддержание чистоты дна и соблюдение гарантированных глубин на операционных акваториях отдельных причалов и других элементах порта (вход в порт, маневровые акватории и т. д.) при всех возможных уровневых режимах. Плавающие причальные сооружения, в отличие от причалов распорного типа, обладают высокой степенью контролепригодности как в воздушной среде, так и под водой. В данном случае одним из основных видов получения информации является органолептический осмотр в сочетании с простейшими линейными измерениями.

Изготавливаемые в настоящее время понтоны, как правило, сертифицируются как стоечные суда и гарантируемый жизненный цикл для них вдвое меньше, чем для стационарных причалов. Увеличение срока службы происходит за счет замены отдельных элементов плавучего понтона, входящего в состав причала, а не ремонта всего причала. Поэтому трактовка понятия *жизненный цикл* для распорных и плавучих сооружений различается и необходима его корректировка в нормативных документах.

Некоторые положения действующих нормативных документов по обследованию портовых гидротехнических сооружений не в полной мере правомерны, а порой их недопустимо применять для яхтенных портов (например, разбивка пикетажа, обозначения швартовых устройств, определения прямолинейности кордона и т. д.). При разработке нормативных документов по яхтенным портам и их инфраструктуры основное внимание уделяется туристическим и рекреационным аспектам, которые являются ограничениями для проектирования ключевого элемента системы — гидротехнических сооружений. При этом в документах из разных областей деятельности имеет место нестыковка требований и трактовки понятий.

Одним из предложений по гармонизации нормативно-правовых актов, удовлетворению требований потребителей услуг и получению является рассмотрение новых подходов к разработке яхтенных марин. С развитием цифровизации производственных процессов обязательным является использование ESG-технологий. Эти принципы (технологии) подлежат внедрению в стратегии планирования и развития проектов по созданию новых и модернизации действующих морских портов с целью достижения характеристик портов пятого поколения. Аббревиатуру ESG можно расшифровать следующим образом: E — Environment — ответственное отношение к окружающей среде; S — Social — социальная ответственность; G — Governance — корпоративное управление.

Экологические принципы определяют степень заботы компании об окружающей среде и применяемых методах сокращения ущерба, наносимого экологии. Социальные принципы определяют степень участия компании в жизни персонала: инвестиции в социальные проекты, поддержание

качества условий труда. Управленческие принципы определяют качество управления компанией и реализации проекта. Реализацию ESG-принципов можно охарактеризовать процессом экологизации, т. е. неуклонного и последовательного внедрения систем технологических, управленческих и других решений, позволяющих повысить эффективность использования естественных ресурсов и условий наряду с улучшением или сохранением среды (или среды жизни) на локальном, региональном и глобальном уровнях. Закладывая данные принципы и технологии в концепцию деятельности организаций, можно построить современное высокоэкологичное социально-ориентированное предприятие.

В настоящее время обследования должны проводиться в соответствии с утвержденными нормативно-правовыми актами. В рамках проведенного обследования яхтенного порта были поэлементно декомпозированы причальные сооружения яхтенного порта и предложены работоспособные и предельные показатели состояния элементов понтонных причалов (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Предельные смещения и деформации плавучего причального сооружения
для плавучих понтонов**

Наименование элемента	Вид дефекта	Показатели состояния элементов	
		Работоспособное	Предельное
Дно на операционной акватории причала	Переуглубление дна при ремонтном черпании или в результате размыва	Локальное переуглубление не более чем на 1,0 м	Определяется расчетом устойчивости системы удержания
	Уменьшение глубины вследствие заносимости или наличия на дне посторонних предметов	В пределах установленного запаса на заносимость	Определяется расчетом в зависимости от осадки яхты
Плавучий корпус	Изменение положения в пространстве: – отклонение продольной оси плавучего причала в плане – увеличение средней осадки понтона плавучего причала на тихой воде – крен понтона на тихой воде – дифферент понтона на тихой воде	До 2° На 25 % 3° 1°	Более 30 % устанавливают расчетами остойчивости и непотопляемости 5° устанавливают расчетами остойчивости и непотопляемости 2° устанавливают расчетами остойчивости и непотопляемости
	Нарушение водонепроницаемости	Водотечность, при которой подъем уровня воды над днищем в отдельном отсеке не превышает 2 см в сутки	Затопление одного водонепроницаемого отсека
Отбойное устройство	Обрыв, повреждения и отсутствие отбоев	До 20 % общего количества	Более 50 % общего количества
	Износ крепления отбоев	До 25 % общего количества	Более 40 % площади сечения
Швартовное устройство	Разрушение и повреждения отдельных устройств	До 10 % общего количества	Более 20 % общего количества
	Износ рымов, швартовных колец, креплений	До 15 %	Более 25 %

Окончание табл. 1

Якорное устройство	Разрывы якорных цепей, стопоров	Не допускаются	Разрыв одного элемента
	Сдвиг якорей	В пределах котлована или не более 0,1 проектной глубины	При выходе якоря из котлована или смещении более чем на 0,15 проектной глубины
	Механический и коррозионный износ якорных цепей и элементов креплений, в том числе рымов якорей	До 15 % площади сечения	Более 15 %; устанавливают расчетами прочности систем раскрепления
Соединительный мост	Повреждения главных балок, пандуса, береговой опоры, лежня, щитов и опор	Вмятины, прогибы без трещин и разрывов	Трещины и разрывы в элементах
	Поражение коррозией	Остаточная толщина металла не менее 90 %	Остаточная толщина менее 80 %
	Повреждения и разрушения сварных швов	Остаточная толщина шва не менее 80 % первоначальной величины	Отслоение стыкуемых частей
Покрытие	Повреждения и разрушения материалов	До 15 % площади поверхности	Более 25 % площади поверхности
Межпонтонные (межсекционные) шарниры	Разрывы и трещины в элементах	Не допускается	Трещины в элементах
	Зазоры (люфты)	Не более 3,5 мм	Более 5 мм
	Износ элементов	Остаточная площадь сечения не менее 95 % проектной	Менее 90 % проектной
Инженерные сети	Нарушение функционирования	Функционирование в соответствии с назначением	Нарушение функционирования
иные элементы конструкции	Нарушение функционирования	Устанавливается проектом (паспортом сооружения)	Устанавливается проектом (паспортом сооружения)

Таблица 2

Предельные смещения и деформации плавучего причального сооружения для плавучих железобетонных понтонов

Наименование элемента	Вид дефекта	Показатели состояния элементов	
		Работоспособное	Предельное
Дно на операционной акватории причала	Переуглубление дна при ремонтном черпании или в результате размыва	Локальное переуглубление не более чем на 1,0 м	Определяется расчетом устойчивости системы удержания
	Уменьшение глубины вследствие заносимости или наличия на дне посторонних предметов	В пределах установленного запаса на заносимость	Определяется расчетом в зависимости от осадки яхты
Плавучий корпус	Изменение положения в пространстве: – отклонение продольной оси плавучего причала в плане – увеличение средней осадки понтона плавучего причала на тихой воде	До 2°	Более 30 % устанавливают расчетами устойчивости и непотопляемости
		На 25 %	

Продолжение табл. 2

	– крен понтона на тихой воде	3°	5° устанавливают расчетами остойчивости и непотопляемости
	– дифферент понтона на тихой воде	1°	2° устанавливают расчетами остойчивости и непотопляемости
	Нарушение водонепроницаемости	Водотечность, при которой подъем уровня воды над днищем в отдельном отсеке не превышает 2 см в сутки	Затопление одного водонепроницаемого отсека
	Разрушение в элементах железобетонных корпусов: – трещины в палубе	Единичные с раскрытием до 1 мм	Множественные с раскрытием более 2 мм
	– трещины в бортах и днище – разрушение поверхностного слоя бетона: а) на глубину до 40 мм; без оголения арматуры; б) на глубину более 40 мм с оголением арматуры; – отколы, сколы и в элементах набора	Единичные с раскрытием до 0,5 мм: – до 15 % площади поверхности; – до 5 % площади поверхности; – уменьшение расчетного сечения не более чем на 10 %	Множественные с раскрытием более 1 мм: – более 25 % площади поверхности; – более 10 % площади поверхности; – уменьшение расчетного сечения более чем на 20 %
	Снижение прочности бетона в элементах железобетонных корпусов	Не более чем на 10 % проектной	Более чем на 20 % проектной установлена исследованиями процессов коррозии бетона
Отбойное устройство	Обрыв, повреждения и отсутствие отбоев	До 20 % общего количества	Более 50 % общего количества
	Износ крепления отбоев	До 25 % общего количества	Более 40 % площади сечения
Швартовное устройство	Разрушение и повреждения отдельных устройств	До 10 % общего количества	Более 20 % общего количества
	Износ рымов, швартовых колец, креплений	До 15 %	Более 25 %
Якорное устройство	Разрывы якорных цепей, стопоров	Не допускаются	Разрыв одного элемента
	Сдвиг якорей	В пределах котлована или не более 0,1 проектной глубины	При выходе якоря из котлована или смещении более чем на 0,15 проектной глубины
	Механический и коррозионный износ якорных цепей и элементов креплений, в том числе рымов якорей	До 15 % площади сечения	Более 15 %; устанавливают расчетами прочности систем раскрепления
Соединительный мост	Повреждения главных балок, пандуса, береговой опоры, лежня, щитов, опор	Вмятины, прогибы без трещин и разрывов	Трещины и разрывы в элементах
	Поражение коррозией	Остаточная толщина металла не менее 90 %	Остаточная толщина менее 80 %
	Повреждения и разрушения сварных швов	Остаточная толщина шва не менее 80 % первоначальной величины	Отслоение стыкуемых частей

Окончание табл. 2

Межпонтонные (межсекционные) шарниры	Разрывы и трещины в элементах	Не допускается	Трещины в элементах
	Зазоры (люфты)	Не более 3,5 мм	Более 5 мм
	Износ элементов	Остаточная площадь сечения не менее 95 % проектной	Менее 90 % проектной
Инженерные сети	Нарушение функционирования	Функционирование в соответствии с назначением	Нарушение функционирования
Специальные элементы конструкции	Нарушение функционирования	Устанавливается проектом	Устанавливается проектом

Предложенные разделения сооружения на элементы и виды дефектов не являются исчерпывающими и должны быть скорректированы под конкретный объект обследования с учетом требований заказчика, нормативно-правовых актов и конструктива гидротехнического сооружения.

Заключение (Conclusion)

В процессе проведенного обследования сооружений выявлен ряд сложных вопросов, требующих системной проработки, а именно: как определить расчетное судно не только для одного понтона, но и для группы понтонов, образующих причальную линию; является ли нарушением швартовка одного судна, длина корпуса которого не выходит за пределы одной причальной линии, но превышает параметр расчетного судна, определенный по одному понтону, и при этом если расчетные суда швартуются носом или кормой, а более длинное судно пришвартовано лагом; насколько необходима декомпозиция на элементы понтонов для обследования или достаточно использования органолептического надводного и подводного подхода; необходим ли предельный срок службы, установленный в размере 25 лет, или следует установить межремонтные интервалы, определяемые по состоянию понтонов или заводом-изготовителем (например, в соленой воде рама металлического понтона может быть разрушена гораздо раньше, чем в пресной, однако при проведении своевременного ремонта ситуация может быть обратной, и понтон в пресной воде потеряет свои свойства раньше); легко ли поддерживать такие простые конструкции в исправном состоянии, не выводя их из эксплуатации или заменять на такие же новые в сравнительно короткие сроки.

Исходя из ранее изложенного можно сделать вывод о том, что адекватная оценка технического состояния плавучих причалов по результатам визуального обследования с минимальными затратами обеспечивается при должной организации экспертной службы в сочетании с непрерывным деформационным мониторингом и своевременными ремонтами, проводимыми эксплуатирующей организацией, поскольку такие мероприятия не требуют длительного вывода сооружения из эксплуатации. Кроме того, в настоящее время на плавучие понтонные причальные сооружения требуется два комплекта проектной документации: один — на причал как гидротехническое сооружение (в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54523–2011), второй — вместе с освидетельствованием на плавучее сооружение, построенное под надзором Российского Классификационного Общества (ранее — Российский Речной Регистр).

Кроме того, необходима разработка единого нормативного документа по обследованию и мониторингу сооружений яхтенного порта, включая мониторинг уровневого режима на акватории и состояния дна. Следует провести корректировку процедуры оценки соответствия состояния гидротехнических сооружений яхтенного порта требованиям безопасной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов П. Н. Современный яхтенный порт — марина. Практика создания / П. Н. Новоселов. — М., 2011. — 112 с.

2. Лебедева А. В. Яхтенные порты и марины в Европе и России / А. В. Лебедева // Судостроение. — 2004. — № 7–8. — С. 31.
3. Guidelines for marina berthing facilities. — Layout & design, 2005. — 132 p.
4. Ohio boating facilities standard and guidelines. — Ohio department of natural resources division of watercraft, resource planning section, 2003. — 96 p.
5. A Code of Practice for the Design and Construction of Marinas and Yacht Harbours. — Yacht Harbour Association, 2013. — 139 p.
6. Marinas and small craft harbor. Regulations and design guidelines. — Dubai, United Arab Emirates: Ports, Customs and Free Zone Corporation, 2007. — 114 p.
7. Butsanets A. Development of Criteria for Assessing the Tourist Attractiveness of Yacht Ports / A. Butsanets, E. Ol'Khovik, S. Kovalev // International Scientific Siberian Transport Forum. — Cham: Springer International Publishing, 2021. — Pp. 1307–1314. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_145.
8. Маколина А. В. Выбор типа причалов для яхт-клуба в финском заливе / А. В. Маколина, И. А. Маколин, Н. Д. Беляев // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт: В 3 ч. Отв. Ред.: Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2019. — Ч. 1. — С. 124–126.
9. Лотырев В. О. Причальный комплекс в Лахтинской гавани / В. О. Лотырев // Неделя науки ИСИ: материалы Всероссийской конференции: в 3 ч. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2021. — Ч. 1. — С. 128–130.
10. Борисов А. М. Проектирование конструкции корпуса железобетонных причальных понтонов / А. М. Борисов, К. Н. Пряничников // Научные проблемы водного транспорта. — 2019. — № 60. — С. 11–25.
11. Векслер А. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А. Б. Векслер, Д. А. Ивашенцев, Д. В. Стефанишин. — СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. — 590 с.
12. Ивашинцов Д. А. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений / Д. А. Ивашинцов, А. С. Соколов, С. Г. Шульман, А. М. Юделевиц. — СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2001. — 432 с.

REFERENCES

1. Novoselov, P. N. *Sovremennyyi yakhtennyi port-marina. Praktika sozdaniya*. M., 2011.
2. Lebedeva, A.V. “Yakhtennyye porty i mariny v Evrope i Rossii.” *Sudokhodstvo* 7–8 (2004): 31.
3. *Guidelines for marina berthing facilities*. Layout & design, 2005.
4. *Ohio boating facilities standard and guidelines*. Ohio department of natural resources division of watercraft, resource planning section, 2003.
5. *A Code of Practice for the Design and Construction of Marinas and Yacht Harbours*. Yacht Harbour Association, 2013.
6. *Marinas and small craft harbor. Regulations and design guidelines*. Dubai, United Arab Emirates: Ports, Customs and Free Zone Corporation, 2007.
7. Butsanets, Artem, Evgeniy Ol'Khovik, and Sergey Kovalev. “Development of Criteria for Assessing the Tourist Attractiveness of Yacht Ports.” *International Scientific Siberian Transport Forum*. Cham: Springer International Publishing, 2021. 1307–1314. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_145.
8. Makolina, A. V., I. A. Makolin, and N. D. Belyaev. “Vybor tipa prichalov dlya yakht-kluba v finskom zalive.” *Nedelya nauki SPbPU. Materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Inzhenerno-stroitel'nyi institut*. Edited by N. D. Belyaev, V. V. Elistratov. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2019. 124–126.
9. Lotyrev, V. O. “Prichal'nyi kompleks v Lakhtinskoi gavani.” *Nedelya nauki ISI. Materialy vserossiiskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2021. 128–130.
10. Borisov, A.M., and K. N. Prjanichnikov. “The design of the hull construction reinforced concrete mooring pontoons.” *Bulletin of VSAWT* 60 (2019): 11–25.
11. Veksler, A.B., D. A. Ivashentsev, and D. V. Stefanishin. *Nadezhnost', sotsial'naya i ekologicheskaya bezopasnost' gidrotekhnicheskikh ob'ektov: otsenka riska i prinyatie reshenii*. SPb.: Izd-vo ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002.
12. Ivashintsov, D.A., A. S. Sokolov, S. G. Shul'man, and A. M. Yudelevich. *Parametricheskaya identifikatsiya raschetnykh modelei gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. SPb.: Izd-vo ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2001.

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

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

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

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

Butsanets, Artem A. —

PhD, Head of the Department of Scientific
and Technical Information and Intellectual Property
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 09 августа 2023 г.

Received: August 9, 2023.

ENSURING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF INLAND WATERWAYS BY USING OFF-BOARD ENVIRONMENTAL TECHNICAL MEANS

V. I. Reshnyak, E. P. Chikov, K. V. Reshnyak

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

The water transport operation, its safety and the organization of the fleet on inland waterways are presented in the paper. The problem of protecting water bodies from pollution by oil products, which are contained in the ship's bottom water (NW) formed during the operation of inland navigation vessels is considered. The results of studying this problem by the authors of the paper, based on the experience of solving this problem in the field of ships operation on the inland waterways, have shown that the most expedient, and often the only possible, way to solve it is an off-vessel treatment strategy, which involves organizing the treatment of bottom-bed water using technical means, which include in general specialized floating facilities providing reception of bilge water from operating vessels, transportation and treatment. The main principles for the offshore cleaning strategy implementation are formulated. In accordance with this strategy it is proposed to consider offshore cleaning as a certain technology, the content of individual operations of which, as well as the composition of the complex of technical means that ensure the implementation of its various options, is determined by the conditions for organizing off-board cleaning on the considered sections of the waterways, which include the need to ensure safety, requirements for the disposal of treated bilge water, as well as economic efficiency. It is shown that under certain conditions it is expedient to carry out separate operations for water purification using different technical means. The main options for the composition of the complex of technical means, including autonomous floating treatment facilities, are proposed. It has been shown that the possibility of choosing the composition of technical means makes it possible to take into account the operating conditions of ships, as well as the organization of off-board cleaning, which provides an effective solution to the problem of ensuring the safety of navigation.

Keywords: bilge oil water, treatment, off-board treatment, choice of technical means.

For citation:

Reshnyak, Valery I., Egor P. Chikov, and Ksenia V. Reshnyak. "Ensuring the environmental safety of inland waterways by using off-board environmental technical means." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 798–805. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-798-805.

УДК 656.62:504.054

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВНЕСУДОВЫХ ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В. И. Решняк, Е. П. Чиков, К. В. Решняк

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

Предметом исследования являются вопросы, относящиеся к области эксплуатации водного транспорта, его безопасности и организации работы флота на внутренних водных путях и посвящена проблеме защиты водоемов от загрязнения нефтепродуктами, содержащимися в судовой подсланевой воде, образующейся в процессе эксплуатации судов внутреннего плавания. Результаты исследований этой проблемы, полученные на основе опыта решения данной проблемы в области эксплуатации судов на внутренних водных путях, показывают, что наиболее целесообразным, а зачастую и единственно возможным способом ее решения является «стратегия внесудовой очистки», предполагающая организацию очистки подсланевой воды с помощью технических средств, к которым относятся специализированные плавсредства, в целом обеспечивающие прием подсланевой воды с эксплуатируемых судов, а также транспортировку и очистку. Сформулированы основные принципы реализации стратегии внесудовой очистки, согласно которым

предлагается внесудовую очистку рассматривать как технологию, содержание отдельных операций которой, а также состав комплекса технических средств, обеспечивающих осуществление разных ее вариантов, определяется условиями организации внесудовой очистки на рассматриваемых участках водных путей, предполагающих необходимость обеспечения безопасности, соблюдение требований к водоотведению очищенной подсланевой воды, а также экономическую эффективность. Показано, что при определенных условиях отдельные операции по очистке воды целесообразно осуществлять с использованием различных технических средств. Предложены основные варианты состава комплекса технических средств, в том числе автономные плавучие очистные сооружения. Показано, что возможность выбора состава технических средств позволяет учитывать условия эксплуатации судов, а также возможность организации внесудовой очистки, что обеспечивает эффективное решение проблемы обеспечения безопасности судоходства.

Ключевые слова: нефтесодержащая подсланевая вода, очистка, внесудовая очистка, выбор технических средств, плавучие очистные сооружения, водоотведение, нефтепродукты, водная среда.

Для цитирования:

Решняк В. И. Обеспечение экологической безопасности внутренних водных путей при использовании внесудовых природоохранных технических средств / В. И. Решняк, Е. П. Чиков, К. В. Решняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 798–805. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-798-805.

Введение (Introduction)

Одной из наиболее актуальных природоохранных проблем при эксплуатации судов как на морских, так и на внутренних водных путях является загрязнение водной среды нефтепродуктами, которые могут попадать туда с нефтесодержащей подсланевой водой (НПВ), а также при аварийных разливах судов. В настоящее время имеется определенный опыт в области решения этой проблемы, включающий, прежде всего, наличие регулирующей законодательной базы [1]–[3], согласно требованиям которой, в частности, запрещен сброс судовой нефтесодержащей воды за борт и установлена необходимость применения технических средств для очистки НПВ. Такими средствами, опыт создания и применения которых описан в работах [4]–[7], в основном являются судовые установки для очистки подсланевой воды, начало широкого применения которых относится ко второй половине 70-х гг. XX в. В основном эти исследования касаются морского транспорта, на внутренних водных путях примерно в это же время началось применение плавучих очистных станций.

Судовые установки для очистки подсланевой воды в начале применения не всегда с высокой степенью надежности обеспечивали требуемое качество очистки воды, в частности, из-за недостатка теоретических исследований в данной области. Одним из главных недостатков являлось отсутствие в составе технологической схемы очистки НПВ, предусмотренной в судовых установках, операций, обеспечивающих удаление эмульгированных нефтепродуктов, т. е. так называемую *глубокую очистку*. Постепенно такие установки были заменены на более эффективные. Этому способствовало не только проведение исследований [5], [8]–[11] в области очистки нефтесодержащей подсланевой воды, но и совершенствование природоохранного законодательства, в частности изменение требований к условиям получения соответствующих документов для использования данного вида оборудования и его испытаниям.

Целью настоящей работы является формирование новых способов реализации стратегии внесудовой очистки НПВ, направленных на решение следующих задач:

- формирование общих принципов организации внесудовой очистки подсланевой воды, образующейся на судах внутреннего плавания;
- формирование комплекса технических средств для внесудовой очистки;
- разработка предложения автономных очистных сооружений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В области эксплуатации внутреннего водного транспорта решение исследуемой проблемы имеет особенности, к которым, прежде всего, относятся отсутствие на большинстве типов речных судов возможности размещения установок для очистки НПВ, а также некоторые отличия в требованиях отведения очищенной подсланевой воды на разных участках водных объектов: реках и их бассейнах.

Поэтому в процессе эксплуатации судов внутреннего плавания решение рассматриваемой проблемы должно быть основано на применении внесудовых технических средств. Новая стратегия предполагает решение проблемы очистки НПВ с помощью технических средств, которые не входят в состав оборудования судов и на них образуется подсланевая вода, но некоторые из них, например, такие, как плавучие очистные станции, находят свое применение. При этом столь ограниченный выбор внесудовых технических средств не позволяет эффективно решать указанную проблему и требует продолжения исследований в области стратегии внесудовой очистки НПВ.

В качестве методов исследования использован системный подход, направленный на защиту водных объектов от загрязнения нефтесодержащей подсланевой водой, образующейся в процессе эксплуатации судов внутреннего плавания как единого способа перемещения нефтесодержащей воды с учетом ее очистки. Результатами применения данного подхода является разработка комплекса технических средств, обеспечивающих безопасное перемещение НПВ, а также разработка рекомендаций по его применению. Кроме того, системный подход, а также наличие комплекса технических средств позволяют учитывать условия организации очистки нефтесодержащей подсланевой воды, которые могут быть разными для различных участков водных путей и тем самым наиболее эффективно решать в целом проблемы защиты окружающей среды при эксплуатации судов на внутренних водных путях.

Анализ современных природоохранных требований показывает, что их соблюдение обеспечивается, в конечном счете, применением технических средств — систем очистки подсланевой воды [1]–[3]. Однако при организации внесудовой очистки необходимо применение и других технических средств, обеспечивающих перемещение НПВ на разных стадиях внесудовой очистки. Процесс перемещения НПВ предусматривает различные операции, эффективность выполнения которых в целом обеспечивает требуемый результат решения проблемы защиты водоемов от содержащихся в них нефтепродуктов. Кроме того, отдельные операции являются взаимосвязанными действиями, определяющими состав технических средств. В связи с этим появляется целесообразность рассмотрения предпринимаемых действий для решения данной проблемы, таких как организация единого процесса безопасного перемещения НПВ от ее приема с обслуживаемых судов до водоотведения очищенной подсланевой воды с учетом условий, в которых этот процесс должен осуществляться.

Учитывая, что данный процесс включает ряд таких операций, как транспортировка, временное хранение, очистка подсланевой воды и ее водоотведение [10], наличие подсланевой воды с момента ее образования до сброса очищенной воды в речной водоем можно считать *технологией перемещения подсланевой воды*, которая в целом должна обеспечивать решение следующих задач:

- возможность сдачи НПВ и ее последующую очистку в любом месте водных путей, где эксплуатируется флот, в том числе маломерный;
- безопасное перемещение НПВ всеми техническими средствами, осуществляющими этот процесс;
- требуемую очистку НПВ перед сбросом в водоем или передачей ее в приемную канализацию;
- наименьшие затраты на реализацию внесудовой очистки НПВ.

Условия реализации указанных задач предполагают выбор стратегии с точки зрения следующих факторов: навигационных условий, типа судна, количества образующейся в границах рассматриваемого района водных путей подсланевой воды, требований к водоотведению очищенной воды, наличия мест расположения внесудовых технических средств и др. Поэтому решения указанных задач могут отличаться на разных участках водных путей и достигаться в каждом конкретном случае с помощью использования различных технических средств.

Результаты и обсуждения (Results and Discussion)

Основным этапом внесудовой очистки НПВ является непосредственно процесс очистки подсланевой воды. Предлагается следующий порядок осуществления этого процесса:

- в зависимости от условий организации и проведения процесса очистки на рассматриваемом участке водных путей заинтересованная сторона (например, группа судовладельческих компаний)

принимает решение о выборе варианта комплекса технических средств, обеспечивающих очистку НПВ (рис. 1);

– разработчиком принимается решение о расстановке указанных технических средств на рассматриваемом участке водных путей;

– согласовываются условия водоотведения очищенной подсланевой воды.

На рис. 1 предложены основные варианты комплексов технических средств, обеспечивающих внесудовую очистку нефтесодержащей подсланевой воды. Функциональные возможности и другие характеристики разных типов плавучих очистных средств описаны в работах [4], [11]. Следует отметить, что варианты предлагаемых комплексов могут значительно отличаться друг от друга уровнем технической сложности, а, следовательно, общей стоимостью. Однако наименее затратные варианты не всегда являются однозначно приемлемыми, так как экономический аспект организации внесудовой очистки НПВ на внутренних водных путях является, как отмечалось ранее, не единственным среди решаемых задач.

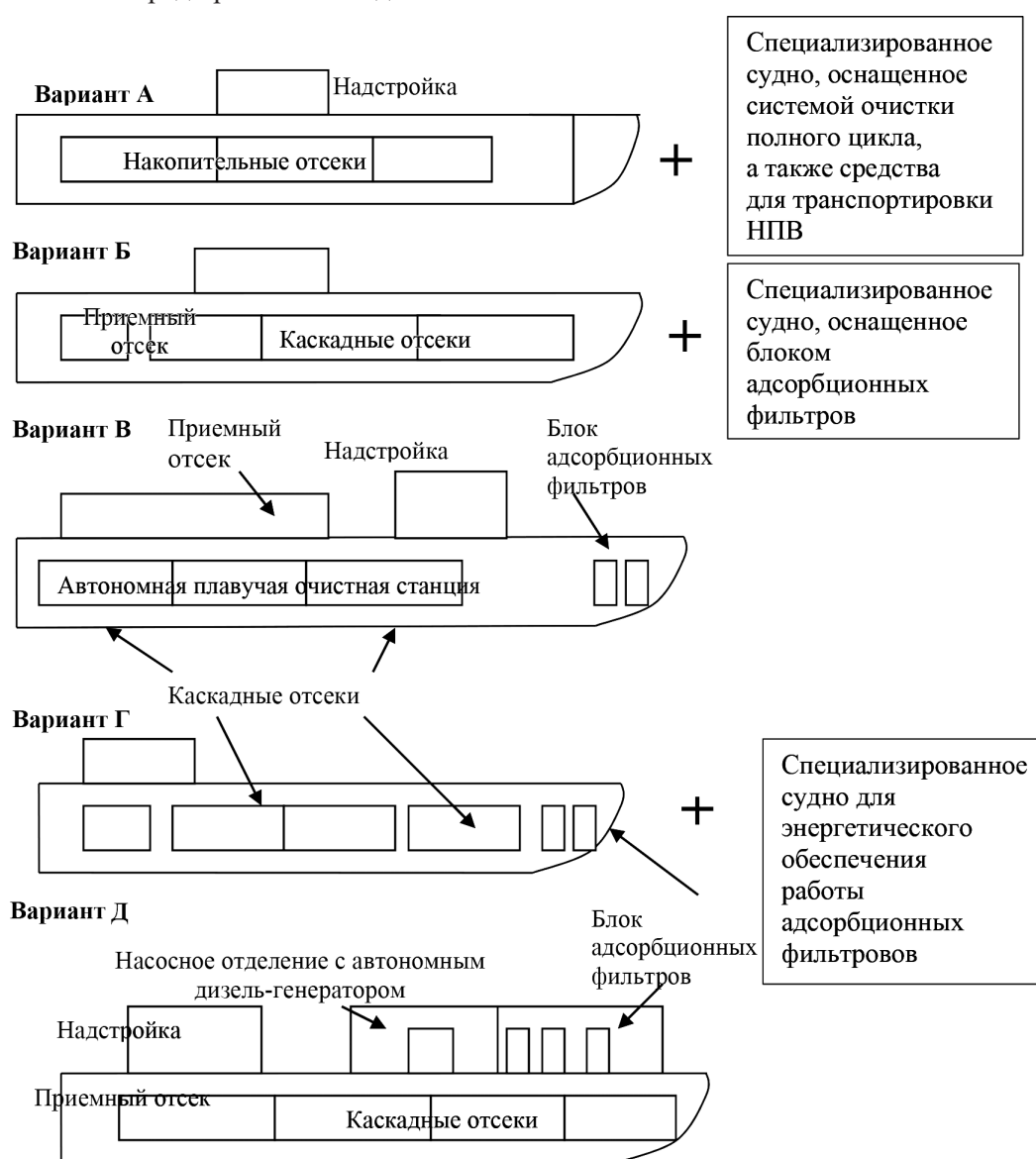


Рис. 1. Варианты комплексов технических средств очистки нефтесодержащей подсланевой воды

Кроме выбора комплекса технических средств для внесудовой очистки НПВ должна решаться задача об их расстановке на обслуживаемом участке водных путей. В процессе решения этой задачи

должны учитываться навигационные условия в местах расположения средств внесудовой очистки: ширина судового хода, скорости течения, глубина, расстояние, удобство и безопасность подхода к ним других плавсредств, условия водоотведения, загрузка этих технических средств и др. Исследования [11], [12] показывают, что это задача оптимизационного характера, т. е. имеющая почти всегда несколько решений, среди которых существуют наилучшие. Например, в работе [13] показано решение рассматриваемой задачи с точки зрения нахождения варианта расстановки, при котором будет обеспечиваться наименьший общий пробег специализированных судов, обслуживающих плавучие очистные сооружения. Кроме того, в работе [13] предложена новая идея организации процесса очистки нефтесодержащей подсланевой воды, а именно выполнение этого процесса при помощи технических устройств, которые могут быть скомпонованы не только в виде единого агрегата (например, такого как судовая установка или применяемые до настоящего времени плавучие очистные станции с полным энергетическим обеспечением и постоянным обслуживанием), но и при размещении их на разных плавсредствах — носителях этих технических устройств, на которых они могут находиться. .

На рис. 2 приведены два варианта организации процесса очистки НПВ. Первый вариант (рис. 2, а) предполагает использование плавучей очистной станции типа Д [4]. Такая плавучая очистная станция является сооружением, в состав которого входят все очистные устройства, реализующие технологию очистки, а также комплекс вспомогательных устройств и объектов (дизель-генераторы, насосы, система электроснабжения, санитарно-техническое оборудование, камбуз, жилые помещения), обеспечивающих функционирование очистных устройств и жизнедеятельность обслуживающего персонала. Второй вариант (рис. 2, б) предполагает применение комплекса технических средств, которые в целом обеспечивают реализацию полного технологического цикла очистки подсланевой воды.

Новый комплекс включает плавучую очистную станцию типа Б, оснащенную каскадными отстойниками, в которых осуществляется первый этап очистки, когда очищаемая вода в каскадных отстойниках движется самотеком. Плавстанция не имеет перекачивающего, а также энергетического оборудования. Обслуживание станции осуществляется периодически, не требуя постоянного присутствия специалистов. Окончательная очистка НПВ обеспечивается в блоке адсорбционных фильтров и перекачивающих насосов, которые размещены на специализированном судне. Данный вариант организации очистки может быть рекомендован для малонаселенных участков водных путей большой протяженности, таких, например, как сибирские реки. На большом участке водных путей расставляются плавучие станции типа Б, которые не требуют постоянного обслуживающего персонала, являясь простыми по конструкции, а, следовательно, недорогими техническими средствами.

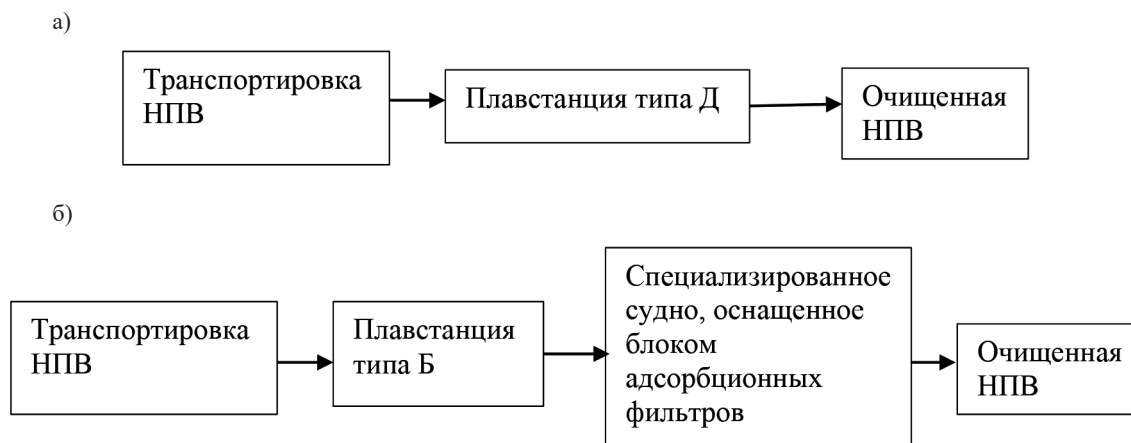


Рис. 2. Варианты организации процесса очистки нефтесодержащей подсланевой воды:

а — использование плавучей очистной станции типа Д;

б — применение комплекса технических средств, обеспечивающих полный технологический цикл очистки подсланевой воды

Такие станции обслуживаются специализированным судном, конструкция которого может предусматривать два основных варианта. Первый вариант предполагает стационарное размещение блока адсорбционных фильтров и перекачивающих насосов, основным его назначением является использование в качестве технического средства для обеспечения окончательной стадии очистки НПВ. Второй вариант представляют собой суда, используемые для других целей, на которых при необходимости временно устанавливают блок адсорбционных фильтров. Местом временного размещения блока фильтров может быть палуба судна. Такие специализированные суда поочередно обслуживают плавстанции и окончательно очищают предварительно очищенную подсланевую воду.

Одним из решений исследуемой проблемы, позволяющих достичь указанных задач, является применение автономных или периодически обслуживаемых плавучих очистных сооружений. Такой вариант автономной плавучей станции был предложен ранее и его новизна подтверждена авторским свидетельством [14]. В предложенной станции очистное оборудование: каскадные отстойники и адсорбционные фильтры, в которых находится принимаемая с судов посланевая вода, размещены таким образом, что вода через них движется самотеком и в очищенном виде сбрасывается за борт. Регулирование качества очищаемой воды может обеспечиваться использованием комбинации таких способов глубокой очистки, как адсорбция и озонирование [15], которые зарекомендовали себя как эффективные в технологии очистки НПВ, что подтверждено опытом эксплуатации оборудования.

Как показывает практический опыт, а также проведенные исследования в целом внесудовая очистка подсланевой воды при эксплуатации судов на внутренних водных путях является наиболее целесообразным, а зачастую и единственно возможным способом решения проблемы обеспечения экологической безопасности при эксплуатации судов внутреннего плавания. Этот способ организации очистки подсланевой воды известен, однако выбор технических средств, позволяющих его реализовать, ограничивается применением плавучих очистных станций, оснащенных энергетическим оборудованием, обеспечивающим функционирование очистного оборудования, а также другими техническими системами, необходимыми для постоянного пребывания на судне обслуживающего персонала. Такой подход не всегда обеспечивает достижение требований, которым должна отвечать организация очистки НПВ на определенном участке водных путей, характеризующихся разными условиями эксплуатации судов, а, следовательно, разными условиями организации внесудовой очистки.

Учитывая, что в целом процесс очистки нефтесодержащей подсланевой воды включает комплекс определенных операций, предлагается этот процесс рассматривать как некоторую технологию, имеющую различные варианты реализации. Применение разных вариантов технологии очистки НПВ требует использования комплекса различных технических средств, создание которого не повлечет значительных финансовых затрат. Например, применение разных вариантов плавучих очистных сооружений основано на проекте так называемого *базового варианта*. При этом остальные варианты при строительстве могут быть получены с использованием разных комплектаций оборудования, размещение которых предусмотрено в базовом варианте.

Выводы (Conclusion)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При реализации стратегии внесудовой очистки нефтесодержащей подсланевой воды, образующейся при эксплуатации судов на внутренних водных путях, целесообразно рассматривать внесудовую очистку как технологию перемещения НПВ и ее очистку.
2. Технология очистки НПВ может осуществляться с использованием разных вариантов, предложенных в настоящей работе.
3. Рассмотренные варианты отличаются комплексом технических средств, обеспечивающих в целом внесудовую очистку НПВ.
4. Сформулированы задачи, которые должны быть решены с использованием внесудовой очистки НПВ в процессе ее организации и реализации.
5. Показано, что возможность выбора реализации стратегии внесудовой очистки позволяет с максимальной степенью эффективности обеспечивать решение данных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года и Протокол 1978 года. — СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 2008. — 706 с.
2. Правила Речного Регистра: в 4 т. — М.: Российский Речной Регистр, 2008. — 1430 с.
3. Правила охраны поверхностных вод [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_18252.htm (дата обращения: 11.06.2022).
4. Решняк В. И. Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: монография / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2011. — 207 с.
5. Курников А. С. Концепция повышения экологической безопасности судна / А. С. Курников. — Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2002. — 80 с.
6. Якименко А. В. Системы очистки сточной воды предприятий как обязательный компонент сохранения окружающей среды / А. В. Якименко // Экологическая безопасность в техносферном пространстве: сборник материалов Третьей Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов. — Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2020. — С. 211–213.
7. Yu L. A review of treating oily wastewater / L. Yu, M. Han, F. He // Arabian journal of chemistry. — 2017. — Vol. 10. — Pp. S1913–S1922. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.020.
8. Hekkenberg R. G. Technological challenges and developments in European inland waterway transport / R. G. Hekkenberg // Transport of Water versus Transport over Water: Exploring the Dynamic Interplay of Transport and Water. — Cham: Springer International Publishing, 2015. — Pp. 297–313. DOI: 10.1007/978-3-319-16133-4_16.
9. Решняк В. И. Регулирование эксплуатационного и аварийного загрязнения окружающей среды на объектах водного транспорта / В. И. Решняк, З. Юзьяк, А. Г. Щуров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 85–90.
10. Пластинин А. Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах в республике Татарстан / А. Е. Пластинин, О. Л. Домнина // Великие реки 2017: труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума: в 3 т. — Н. Новгород: Нижегородский гос. архитектурно-строительный ун-т, 2017. — Т. 1. — С. 322–325.
11. Решняк В. И. Теоретические основы технологии перемещения подсланевой воды, образующейся при эксплуатации судовых энергетических установок / В. И. Решняк, А. И. Каляуш, А. Н. Григорьев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 70–76.
12. Решняк В. И. Система управления экологической безопасностью судов на внутренних водных путях: монография / В. И. Решняк. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. С. О. Макарова, 2017. — 148 с.
13. Решняк В. И. Внесудовая очистка нефтесодержащей подсланевой воды при эксплуатации судов внутреннего плавания / В. И. Решняк, О. Л. Домнина // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 274–280. DOI: 10.37890/jwt.vi72.304.
14. Пат. 204354 Российская Федерация, МПК В63J 4/00. Автономная плавучая станция для очистки судовой нефтесодержащей воды / В. И. Решняк, Е. П. Чиков; заяв. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — № 2020143776; заявл. 29.12.2020; опубл. 21.05.2021, Бюл. № 15.
15. 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.

REFERENCES

1. *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships of 1973 and the Protocol of 1978*. SPb.: TSNIIMF, 2008.
2. *Pravila Rechnogo Registra*. M.: Rossiiskii Rechnoi Registr, 2008.
3. *Pravila okhrany poverkhnostnykh vod*. Web. 11 Jun. 2022 <http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_18252.htm>.
4. Reshnyak, V. I. *Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchei podslanevoi vodoi pri ekspluatatsii sudov i sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya*. SPb.: SPbGUVK, 2011.

5. Kurnikov, A. S. *Kontseptsiya povysheniya ekologicheskoi bezopasnosti sudna*. N. Novgorod: Izd-vo VGAVT, 2002.
6. Yakimenko, A. V. "Wastewater treatment systems as a mandatory environmental component." *Ekologicheskaya bezopasnost' v tekhnosfernom prostranstve*. Ekaterinburg: Rossiiskii gosudarstvennyi professional'no-pedagogicheskii universitet, 2020. 211–213.
7. Yu, Li, Mei Han, and Fang He. "A review of treating oily wastewater." *Arabian journal of chemistry* 10 (2017): S1913–S1922. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.020.
8. Hekkenberg, R. G. "Technological challenges and developments in European inland waterway transport." *Transport of Water versus Transport over Water: Exploring the Dynamic Interplay of Transport and Water*. Cham: Springer International Publishing, 2015. 297–313. DOI: 10.1007/978-3-319-16133-4_16.
9. Reshnyak, V. I., Z. Yuzvyak, and A. G. Shchurov. "Regulation of operational and accidental pollution of the environment at the water transport." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1 (2013): 85–90.
10. Platinin, A.E., and O.L. Domnina. "Otsenka ekologicheskogo riska transportnykh proisshествii na vodnykh ob'ektakh v respublike Tatarstan." *19th International Scientific and Industrial Forum (ICES) "GREAT RIVERS" 2017*. Vol. 1. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi arkhitekturo-stroitel'nyi universitet, 2017. 322–325.
11. Reshnyak, Valeriy Ivanovich, Alexander Ivanovich Kalyaush, and Alexander Nikolaevich Grigoriev. "Theoretical principles of technology of movement of bilge water in marine power installations." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2016): 70–76.
12. Reshnyak, V. I. *Sistema upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. S. O. Makarova, 2017.
13. Reshnyak, Valery I., and Olga L. Domnina. "Off-vessel purification of oil-containing bilge water of inland navigation vessels." *Russian Journal of Water Transport* 72 (2022): 274–280. DOI: 10.37890/jwt.vi72.304.
14. Reshnyak, V.I., and E. P. Chikov. RU 204354 U1, IPC B63 J 4/00. Avtonomnaya plavuchaya stantsiya dlya ochistki sudovoi neftesoderzhashchei vody. Russian Federation, assignee. Publ. 21 May 2021.
15. Reshnyak, Valery I., Andrey E. Platinin, 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.

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
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
Решняк Ксения Валерьевна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: reshnyakkv@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
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
Reshnyak, Ksenia V. —
Senior lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: reshnyakkv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 31 июля 2023 г.
Received: July 31, 2023.

ASSESSING THE RESULTS OF WORK ON STRENGTHENING THE SOILS OF THE FOUNDATION OF LOCK № 5 OF THE VOLGA-DON SHIPPING CANAL AND PROPOSALS FOR STABILIZING THE CHAMBER POSITION

K. P. Morgunov

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

The results of work to strengthen the soil foundation of the chamber of lock № 5 of the Volga-Don Shipping Canal, carried out in 2016–2017, are analyzed. The need to carry out work to strengthen the soil was caused by an increase in the intensity of sedimentation of the central sections of the lock chamber, which began in 2005. To stabilize the chamber position, the technology of two-component jet grouting is implemented. This technology assumes the formation of several longitudinal soil-cement walls in the soils of the lock chamber base, which would transfer the load from the weight of the chamber to the harder clay soils of the water-resistant layer. However, as a result of the work performed, the precipitation intensity has increased. Engineering-geological, hydrological and geophysical studies conducted in 2018–2020 recorded the absence of formed soil-cement elements in the soils of the chamber base. An analysis of the soil samples characteristics taken from the chamber base has showed that a layer of soils of 10–12 m thickness is composed of loess rocks, below which water-resistant clayey rocks lie. Initially, there were several confined and non-confined aquifers in the soils of the lock base, and the creation of a hydroelectric complex and the formation of a level difference between the upper and lower pools led to the formation of a filtration flow with a significant pressure gradient at the base of the chamber. An analysis of the properties and structure of loess soils has showed their predisposition to subsidence, transition to a floating state and liquefaction with an increase in water content. Under the conditions of weak water-saturated loess soils, the supply of a cement mixture into them under significant pressure did not lead to the formation of soil-cement elements. Thus, in accordance with the current regulatory documents, the technical condition of the gateway is defined as pre-emergency, and the security level is defined as unsatisfactory. Methods for reducing the intensity of the chamber sedimentation such as cutting through the loess layer with piles, physical and chemical strengthening of soils and water protection of the massif at the base of the chamber are considered and evaluated.

Keywords: shipping lock, loess soil, filtration flow, bored and crushed stone piles, soil silicification.

For citation:

Morgunov, Konstantin P. "Assessing the results of work on strengthening the soils of the foundation of lock № 5 of the Volga-Don shipping canal and proposals for stabilizing the chamber position." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 806–819. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-806-819.

УДК 624.131.431.3; 626.45

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ШЛЮЗА № 5 ВОЛГО-ДОНСКОГО СУДОХОДНОГО КАНАЛА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЕГО КАМЕРЫ

К. П. Моргунов

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

Выполнен анализ результатов работ по укреплению грунтов основания камеры шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала, проведенных в 2016–2017 гг. Отмечается, что необходимость проведения работ по укреплению грунтов была вызвана увеличением интенсивности осадок центральных секций камеры шлюза, начавшейся в 2005 г. Для стабилизации положения камеры реализована технология двухкомпонентной струйной цементации, предполагающая формирование в грунтах основания камеры шлюза нескольких продольных грунтоцементных стен, которые могут передать нагрузку от веса камеры на более твердые

глинистые грунты водоупорного слоя. Однако в результате выполненных работ интенсивность осадок увеличилась. В результате проведенных инженерно-геологических, гидрологических и геофизических исследований, выполненных в 2018–2020 гг., было зафиксировано отсутствие в грунтах основания камеры сформировавшихся грунтоцементных элементов. Анализ характеристик проб грунтов, отобранных из основания камеры, показал, что слой грунтов толщиной 10–12 м сложен из лёссовых пород, ниже которых залегают глинистые водоупорные породы. В грунтах основания шлюза изначально имелось несколько напорных и безнапорных водоносных горизонтов, а создание гидроузла и формирование перепада уровней между верхним и нижним бьефами обусловило наличие в основании камеры фильтрационного потока со значительным градиентом напора. Анализ свойств и структуры лёссовых грунтов показал их предрасположенность при увеличении водосодержания к просадкам, переходу в плавунное состояние и разжижению. В условиях слабых водонасыщенных лёссовых грунтов подача в них цементной смеси под значительным давлением не привела к формированию грунтоцементных элементов. Таким образом, в соответствии с действующими нормативными документами, техническое состояние шлюза определяется как предаварийное, а уровень безопасности — как неудовлетворительный. Выполнена оценка способов уменьшения интенсивности осадок камеры: прорезка лёссовой толщи сваями, физико-химическое укрепление грунтов и водозащита массива в основании камеры.

Ключевые слова: судоходный шлюз, лёссовый грунт, фильтрационный поток, буронабивные и щебеночные сваи, силикатизация грунта, гидроузел, камера шлюза.

Для цитирования:

Моргунов К. П. Оценка результатов работ по укреплению грунтов основания шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала и предложения по стабилизации положения его камеры / К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 806–819. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-806-819.

Введение (Introduction)

Трасса Волго-Донского судоходного канала, в соответствии с проектом [1], [2], была проложена по местности со спокойным рельефом по наиболее низким отметкам. Основными критериями выбора расположения трассы канала, соединяющего Волгу и Дон, являлись его наименьшая длина и водообеспеченность. Обстоятельством, предполагающим снижение объемов работ и их стоимости, являлось то, что канал пересекает водораздел в наиболее удовлетворительных геологических условиях. После выхода из Волги через Сарептский затон канал девятью однокамерными шлюзами по долине реки Сарпы и балке Солянка поднимается на водораздел между Волгой и Доном. Общая длина этого участка составляет 21 км, напор на шлюз № 1 — 11,4 м, на шлюзы № 2–9 — по 10,4 м. При этом вначале проектировщикам, а затем и строителям пришлось прокладывать сооружения канала в грунтах, свойства которых не всегда обеспечивали необходимые условия для эффективной эксплуатации этих сооружений. В значительной мере это относится, прежде всего, к району расположения гидроузлов шлюзов № 5 и 6. Эти гидроузлы расположены на волжском склоне канала, в тальвеге балки Солянка в устьевой, наиболее суженной ее части, на расстоянии 14,5 км от начала трассы канала (шлюз № 5), на расстоянии 2,4 км друг от друга. Именно структура и свойства грунтов, залегающих в основании шлюзов № 5 и № 6, привели в дальнейшем, как показали наблюдения, к проблемам, существенно осложнившим эксплуатацию гидросооружений и, прежде всего, к сверхпроектным осадкам центральных секций камеры шлюза. Для уменьшения интенсивности этих осадок на гидроузле шлюза № 5 был выполнен цикл работ по укреплению грунтов основания камеры.

Целью статьи является оценка результатов работ по укреплению грунтов основания камеры и выработка предложений по стабилизации положений ее конструкции.

Методы и материалы (Methods and Materials)

По конструкции шлюз № 5 — типовой шлюз Волго-Донского судоходного канала: однокамерный однопольный, с железобетонной разрезной камерой, состоящей из семи секций, отделенных от голов шлюза и друг от друга температурно-осадочными швами — рис. 1. Камера разрезана по оси сквозным швом, защищенным противотеплоизоляционной шпонкой. Ее левая и правая части (полусекции) симметричны, каждая из них представляет жестко соединенные между собой стенку, днищевую и тыловую консоли переменных профилей.

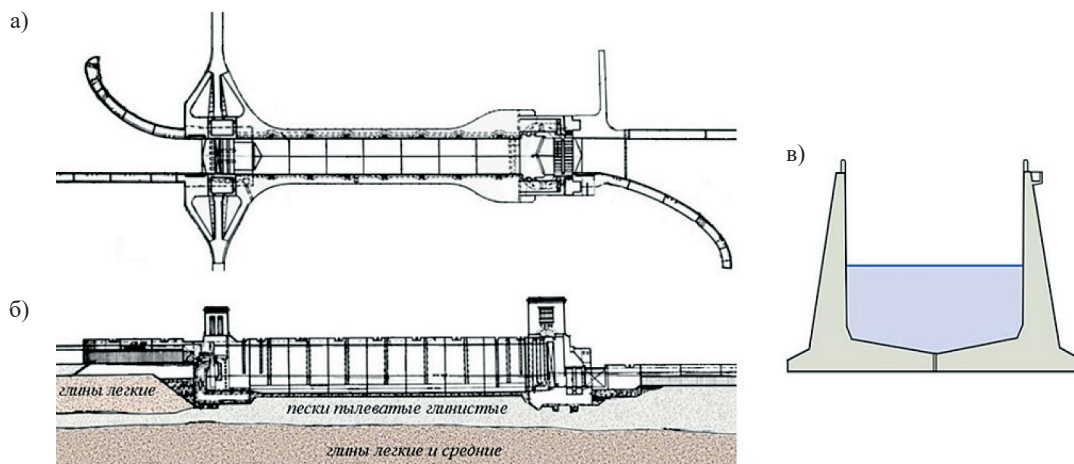


Рис. 1. Схема шлюза № 5:
а — план; б — продольный разрез; в — разрез по секции камеры

В соответствии с действующими нормативными документами [3] на шлюзе начиная с момента его строительства, регулярно проводился мониторинг параметров, определяющих безопасность сооружения, в частности контролировались вертикальные перемещения (осадки) конструкций. Осадки по всем конструкциям шлюза № 5 (головы и секции) до 2005 г. не превышали 0,5 мм/год, не выходя за предельно допустимые значения, установленные в соответствии с декларациями безопасности — не более 1 мм/год. Начиная с 2005 г. вертикальные перемещения некоторых конструкций шлюза увеличились. В период 2006–2013 гг. интенсивность осадок по секциям III, IV, V составила 1,4 мм/год; 2,8 мм/год; 2,9 мм/год соответственно. С 2013 г. осадки приобрели прогрессирующий характер, их интенсивность составила, соответственно, 3,5 мм/год; 6,0 мм/год; 5,0 мм/год. Интенсивность осадки остальных секций и голов шлюза не выходила за допустимые значения. В результате проведения натурных исследований, наблюдений и научно-исследовательских работ, выполненных после обнаружения сверхнормативных осадок конструкций шлюза [4], были установлены причины таких осадок. Определяющим фактором оказались свойства грунтов основания камеры шлюза № 5, которые характеризуются низкими прочностными показателями и высокой сжимаемостью под нагрузкой.

По данным исследований, выполненных на этапе проектирования гидроузла, шлюз № 5 врезан в современные аллювиальные отложения, которые подстилаются породами нижнебакинского горизонта четвертичной системы. В основании конструкций шлюза № 5 залегают водоносные супеси нижнебакинского горизонта мощностью 4–8 м. Нижнебакинский горизонт подстилается легкими и средними суглинками андреевской свиты, под ними находятся легкие и средние супеси и легкие суглинки онкофорового горизонта. Большая часть днища камеры врезается в толщу легких водонасыщенных супесей нижнебакинского горизонта, близких по своему составу к пылеватым тонкозернистым пескам. Отложения нижнебакинского горизонта представлены в верхней части супесями пылеватыми, пластичными, с прослоями глины тугопластичной и линзами песка, в нижней части глинами мягко- и тугопластичными, с прослоями песка мелкого, водонасыщенного. Мощность супесей 5,9–7,7 м. Мощность глин составляет 3,0–5,9 м. Отложения нижнебакинской свиты подстилаются толщей супесей, суглинков и глин андреевской свиты.

По итогам исследований, выполненных в 2008–2010 гг., были сформулированы предложения по укреплению грунтов основания шлюза методом струйной цементации, на основании которых был разработан проект работ по укреплению основания камеры шлюза [5]. Проект предполагал усиление грунтов основания камеры шлюза путем армирования грунтоцементными элементами, изготовленными с использованием двухкомпонентной технологии струйной цементации. Предусматривалось также устройство противодиффузионной завесы в дамбе, формирующей напорный фронт гидроузла и отделяющей территорию гидроузла от водохранилища верхнего бьефа, созданием в массиве дамбы грунтоцементных элементов.

Технология укрепления грунтов основания камеры заключалась в устройстве из обратной засыпки камеры наклонных скважин под днище глубиной до глинистого водоупорного слоя с заглублением в водоупор на 0,5 м и подачей в них цементного раствора под давлением 45 МПа. Кроме того, по аналогичной технологии должны были быть выполнены вертикальные скважины через днище камеры. Работы были проведены в 2016–2017 гг. Всего было устроено 860 скважин из обратной засыпки и 130 скважин в днище камеры. Предполагалось, что в результате в грунте под тыловыми консолями стен камеры будут сформированы две продольные грунтоцементные стенки шириной не менее 300 см, а также две продольные стенки под днищем камеры на расстоянии около 6 м от центральной осевой шпонки, которые упершись в слой водоупора, зафиксируют положение камеры шлюза в слое водоупора, прекратив ее осадки.

Результаты (Results)

Во время выполнения работ в 2016 г. интенсивность осадок конструкций камеры резко возросла — до 26 мм/год. С началом навигации 2017 г. интенсивность осадок конструкций еще более увеличилась — по левой стороне секции IV до 59 мм/год, по правой — до 64 мм/год (рис. 2).

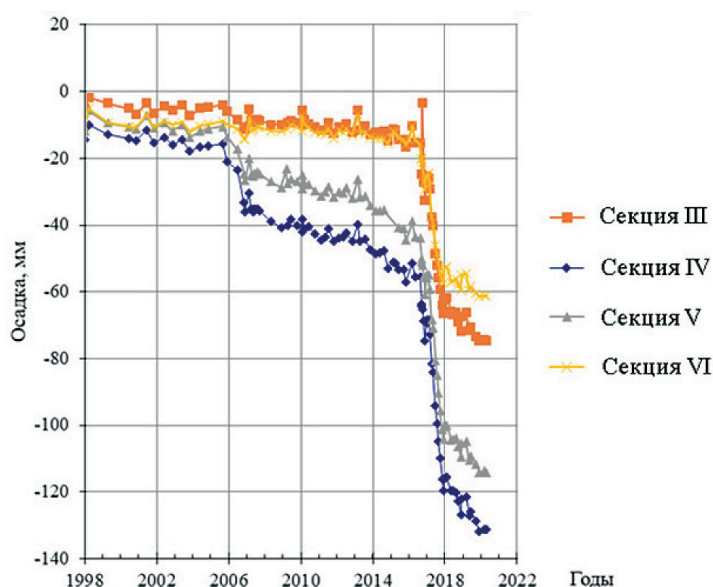


Рис. 2. Осадки секций камеры шлюза № 5

С началом выполнения работ увеличились горизонтальные отклонения верха стен камеры в сторону засыпки. За период с июня 2016 г. по июнь 2017 г. для центральных секций камеры они составили: по секции III — 46 мм; по секции IV — 24 мм; по секции V — 14 мм. В последующие годы интенсивность осадок конструкций камеры шлюза несколько уменьшилась, однако при этом она существенно превышала величины, определенные критериями безопасности. По центральным секциям камеры шлюза (секции III, IV, V) интенсивность осадки составила 5,5–7,0 мм/год, осадки остальных секций происходили с интенсивностью 1,0–3,5 мм/год.

Несмотря на комплекс выполненных работ по укреплению грунтов основания, целью которых являлась стабилизация положения камеры шлюза, в соответствии с действующими нормативными документами [6] техническое состояние шлюза № 5 ФБУ «Администрация «Волго-Дон» было определено как предаварийное, а уровень безопасности — как неудовлетворительный.

В 2018–2020 гг. на шлюзе № 5 были выполнены научно-исследовательские работы по оценке результата реализации проекта по укреплению грунтов основания шлюза № 5 [7]. В результате проведения комплекса инженерно-геологических, гидрологических, геофизических исследований было установлено, что выполненные работы по укреплению основания камеры шлюза № 5 грунтоцементными элементами по методу Jet Grouting не дали ожидаемого результата. Исследования,

в том числе контрольное бурение скважин в местах предполагаемого расположения грунтоцементных элементов и анализ отобранных образцов грунтов, показали отсутствие сформировавшихся грунтоцементных элементов в верхней зоне основания. Выполненное в процессе исследований георадарное сканирование грунтов в основании камеры шлюза также не зафиксировало наличия сформировавшихся грунтоцементных структур. Анализ данных выполненных исследований позволил уточнить характер грунта в основании камеры шлюза № 5: на глубине около 10,0 м от отметки днища камеры залегает водоупор — глина, а весь слой между дном и водоупором заполнен весьма водонасыщенным грунтом — песком пылеватым, зеленовато-серым, с линзами суглинка, текучей супеси.

На основе полученных результатов исследования был сделан вывод о том, что наличие в грунтах основания постоянного фильтрационного потока с весьма значительным градиентом, направленного как от верхнего бьефа к нижнему, так и в диагональном направлении (боковая фильтрация), не позволило сформироваться грунтоцементным элементам, закачиваемая в скважины цементная смесь вымывалась фильтрационным потоком до момента схватывания. Такой отрицательный результат работ по укреплению грунтов основания шлюза № 5 свидетельствует о недооценке состояния грунтового массива и фильтрационных потоков в нем на этапе разработки проекта и приводит к необходимости более тщательного и детального анализа ситуации для выработки действенного метода стабилизации положения камеры шлюза.

В процессе проведения исследований [7] лабораторными методами определялись физико-механические свойства грунтов (на образцах ненарушенной и нарушенной структуры); испытания грунтов выполнялись в соответствии с действующими методиками и ГОСТами. Всего на гидроузле шлюза № 5 пробы грунта были взяты из одиннадцати скважин: скважины 1–9 были пробурены через днище камеры, скважина 10 — в обратной засыпке в районе верхней головы шлюза, скважина 11 — в обратной засыпке у нижней головы (см. рис. 3). При этом скважины устраивались как в массиве грунтов основания, так и в местах, в которые было произведено закачивание цементного раствора и предполагалось формирование грунтоцементных элементов.

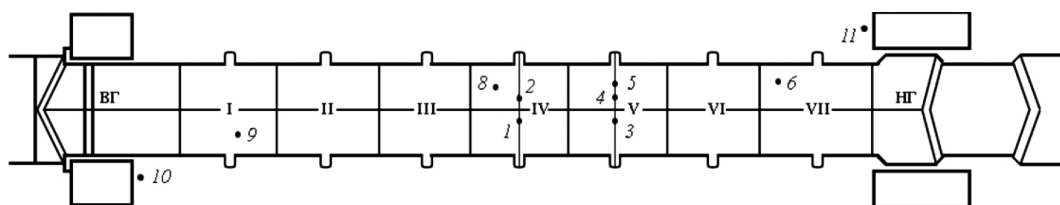


Рис. 3. Схема расположения скважин на шлюзе № 5:
I–VII — номера секций камеры; 1–11 — номера скважин

Для глинистых грунтов по образцам в лабораторных условиях определялись: естественная влажность, верхний и нижний пределы пластичности, плотность в природном сложении, плотность частиц грунта, гранулометрический состав ситовым и ареометрическим методами. Расчетным методом определялись показатель текучести, коэффициент пористости и коэффициент водонасыщения. Из физико-механических свойств определялись показатели прочностных свойств методом одноплоскостного среза (консолидированно-дренированные испытания при природной влажности). Показатели деформационных свойств определялись методом компрессионного сжатия с конечной нагрузкой до 0,3 МПа без разгрузки (в естественном состоянии). Расчет модуля деформации был выполнен для интервала нагрузок 0,1–0,2 МПа с применением поправочных коэффициентов mk . Для песков определялись следующие показатели: гранулометрический состав ситовым методом с промывкой; природная влажность, плотность и коэффициенты фильтрации в максимально плотном и предельно рыхлом сложениях; углы внутреннего трения. Расчетным способом определялись коэффициенты пористости в максимально плотном и предельно рыхлом сложениях и коэффициент водонасыщения. О состоянии грунта в основании камеры шлюза свидетельствует тот факт, что при бурении скважин из них начинался интенсивный излив водно-грунтовой пульпы — рис. 4 и 5.



Рис. 4. Излив водно-грунтовой пульпы из скважины при бурении (фото автора)



Рис. 5. Консистенция пробы грунта, извлеченного из скважины (фото автора)

При исследовании грунтов в лаборатории было выявлено, что грунты из скважин, пробуренных в местах закачивания цементного раствора, и грунты из других скважин по физическим показателям практически не отличаются, что свидетельствует о том, что закачанная в скважины смесь не сформировала ожидаемых грунтоцементных элементов. В одной из скважин (в скважине № 5) зафиксировано слабое наличие грунтоцементного раствора в виде небольших единичных включений галечника слабоокатанного слабосцементированного, который легко рассыпался при небольшом усилии. В скважине № 6 грунтоцементный раствор оказался в виде песка гравелистого с включением до 25 % галечника слабоокатанного слабосцементированного. Гранулометрический состав грунтов (распределение частиц по размеру) по некоторым скважинам представлен в таблице.

Гранулометрический состав проб грунта

Номер скважины	Глубина отбора, м	Наименование грунта по ГОСТу 25100–2011	Размеры частиц, мм								
			>10,0	10,0–5,0	5,0–2,0	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01
			Содержание частиц, %								
1	2,5	Песок пылеват. неоднород.	0	0	0,5	0,2	0,6	0,4	15,3	83	0
1	4,5	>>	0	3	3,3	2,4	6	1,2	13,6	70,5	0
1	7,0	>>	0	0	1,1	1,1	4,6	4,2	16,4	72,6	0
3	3,0	>>	0	0	0	0	0,4	0,4	23,3	75,9	0
3	7,0	>>	0	0	0,5	0,1	0,4	0,3	22,5	76,2	0
5	4,0	>>	0	0,1	0,8	0,6	1,8	1,6	16,7	78,4	0
5	7,0	>>	0	0,2	1,2	0,5	1,5	1,2	14,6	80,8	0
5	10,0	>>	0	0	1,2	0,5	0,8	1,5	15,3	80,7	0
10	2,0	Песок средней крупности неоднород.	0	6,0	2,1	9,9	13,8	41,5	25,0	1,7	10
10	4,0	>>	0	0,0	5,2	18,6	20,6	36,8	15,6	3,2	10
10	6,0	>>	0	0,0	7,5	20,8	20,0	37,8	12,0	1,9	10
10	8,0	>>	0	0,0	3,2	13,1	21,4	38,7	15,6	8,0	10
10	10,0	>>	0	0,0	5,5	15,4	12,1	37,4	20,1	9,5	10
10	12,0	>>	0	0,8	2,8	6,2	17,0	45,9	24,9	2,4	10
10	14,0	>>	0	0,4	2,3	5,5	15,4	45,6	28,2	2,6	10
10	14,8	>>	0	1,0	1,7	5,7	12,5	38,5	29,1	11,5	10
11	3,0	>>	0	2,8	4,9	21,5	14,2	39,2	13,9	3,5	11
11	5,0	>>	0	0,0	4,9	19,8	22,5	40,2	11,8	0,8	11
11	7,0	>>	0	0,1	1,8	3,9	15,8	43,4	33,7	1,3	11

В таблице приведены данные по скважинам № 1, 3, 5, устроенным в наиболее проблемных секциях IV и V камеры (см. рис. 3), а также по скважинам № 10 и 11, расположенным в обратной засыпке. Поскольку скважины № 10 и 11 пройдены в техногенных грунтах, состав грунтов в них отличается от грунтов в основании камеры шлюза. Анализ характеристик грунтов, залегающих в основании шлюза, позволяет сделать заключение о том, что их можно характеризовать как лёссовые.

Обсуждение (Discussion)

По поводу трактовки терминов «лёсс» и «лёссовый грунт» у специалистов существуют разногласия [8], [9]. В настоящее время принято объединять лёсс и многочисленные разновидности лёссовых грунтов термином «лёссовые породы». При этом очень часто между ними не делают различия, поскольку порой их сложно разделить между собой. В ГОСТе 25100–82 «Грунты. Классификация»¹ дано следующее определение: «...грунт лёссовый — пылеватоглинистый грунт, содержащий по гранулометрическому составу более 50 % пылеватых частиц (размером 0,05–0,005 мм), легко- и среднерастворимые соли и карбонаты кальция; однородный, преимущественно макропористый; в маловлажном состоянии способен держать вертикальный откос; при замачивании маловлажный лёссовый грунт дает просадку, легко размокает и размывается, а при полном водонасыщении может переходить в плавунное состояние».

Следует отметить, что термина «лёсс» в этом документе нет, используется понятие «лёссовый грунт». В следующих редакциях этого ГОСТа (ГОСТ 25100–95, ГОСТ 25100–2011, ГОСТ 25100–2020) термины «лёсс», «лёссовый грунт», «лёссовые породы» отсутствуют, они заменены термином «просадочный глинистый грунт», что многими специалистами (например, [10]–[12]) воспринято негативно. Между тем следует дифференцировать понятия «лёсс» и «лёссовые породы», так как они различаются по структуре и гранулометрическому составу. В целом это песчано-глинисто-пылеватые грунты, содержащие более 50 % частиц размером менее 0,05 мм, обладающие высокой пористостью [13]. Лёссы более однородны по составу, для них характерны высокое содержание (более 70–80 %) тонкопесчаных (0,1–0,05 мм) и крупнопылеватых (0,05–0,01 мм) частиц, малое количество частиц крупнее 0,25 мм и наличие глинистой фракции, которая обычно не превышает 16 %. Лёссовые породы характеризуются более разнообразным гранулометрическим составом. Выделяют лёссовидные суглинки, лёссовидные супеси, лёссовидные пески и лёссовидные глины. Гранулометрический состав лёссовых пород колеблется от легких пылеватых супесей и мелкозернистых пылеватых песков до глин. В большинстве случаев, лёссовые породы представлены пылеватыми суглинками, в составе которых содержится 50–80 % пылеватых частиц диаметром 0,05–0,002 мм, 3–30 % составляют глинистые частицы (менее 0,002 мм), до 15 % мелкопесчаных частиц (0,05–0,25 мм) и не более 5 % составляют частицы крупнее 0,25 мм.

Важным свойством как лёссов, так и лёссовых пород является их высокая пористость в сухом состоянии, способствующая существенной просадочности таких грунтов при их увлажнении. При этом просадочность лёссовых пород выражена менее четко, чем лёссов. Просадочность таких пород при их увлажнении определяется строением и взаимным расположением их структурных элементов. Как известно, вода в грунтах может находиться в следующих состояниях [13], [14]:

- *гигроскопическая вода*, обволакивающая частицу грунта слоем толщиной в одну молекулу и находящаяся под действием только молекулярных сил;
- *пленочная вода*, обволакивающая частицы грунта, но не заполняющая полностью поры между ними; эта вода может перемещаться в грунте под действием молекулярных сил и сил тяжести, не передавая гидростатического давления;
- *капиллярная вода*, которая заполняет мелкие поры грунта и находится под действием сил поверхностного натяжения и сил тяжести, передавая гидростатическое давление;
- *свободная гравитационная вода*, которая полностью заполняет все поры грунта, передает гидростатическое давление и перемещается под действием силы тяжести.

¹ ГОСТ 25100–82. Грунты. Классификация. Утв. и введ. в действ. Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 31 декабря 1981 г. № 284, прил. 1. С. 7.

Если грунт находится в маловлажном состоянии и в нем имеется лишь гигроскопическая (прочносвязанная) вода, то он представляет собой материал, обладающий значительным сопротивлением механическим воздействиям. Водные оболочки прочносвязанной воды являются настолько плотными, что они сопротивляются сжатию, сдвигу и растяжению как твердые тела, поэтому грунт в таком состоянии обладает упругостью, высоким сопротивлением сжатию и сдвигу.

При повышении содержания влаги в грунте в нем появляется пленочная (слабосвязанная) вода. При дальнейшем увлажнении грунт может иметь полностью сформированные оболочки молекулярно связанной воды и, кроме того, в нем может находиться вода в свободном от молекулярного воздействия состоянии. В этом случае песчаные и крупнопылеватые частицы как бы плавают в общей коллоидной массе, непосредственно не контактируя друг с другом. Структурные элементы лёссовых пород представляют собой глобулярные агрегаты, состоящие из первичных минеральных частиц (кварц, полевой шпат), покрытых несплошным («дырчатым») слоем тонкодисперсного вещества, как правило, кальцитового состава — рис. 6.

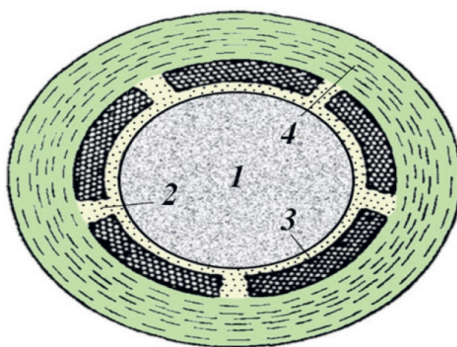


Рис. 6. Схема строения глобулярного агрегата:
1 — минерал (кварц, полевой шпат); 2 — гель из аморфного силиката;
3 — кальцитовая оболочка; 4 — глинистые частицы

Снаружи эта структура покрывается слоем сложного состава, состоящего преимущественно из глинистых частиц. Контакты между отдельными структурными элементами лёссовых грунтов имеют ионно-электростатическую природу, благодаря чему глобулярные агрегаты объединяются в более крупные структурные единицы размером более 0,1 мм и весь грунт приобретает комковатую структуру. Такие структурные элементы неустойчивы и легко разрушаются на отдельные глобулы при повышении влагосодержания грунта.

Еще одной особенностью лёссовых пород является наличие в них карбонатов, а также водорастворимых соединений (гипс, хлористый натрий и другие легкорастворимые соли) в различных гранулометрических фракциях. Такие вещества при малой влажности породы создают достаточно прочные кристаллизационные связи между отдельными частицами в породе, обуславливая агрегацию глинистых и коллоидных фракций. Однако при насыщении породы водой и растворении этих веществ связи между частицами разрушаются, что выражается в довольно быстром размокании и размываемости грунта. Сопротивление сдвигу лёссовых пород также определяется их физическим состоянием: в сухом состоянии его величина значительна, при увлажнении оно сильно снижается; при замачивании существенно уменьшается угол внутреннего трения, величина сцепления падает практически до нуля [15], модуль деформации снижается в 3–4 раза [11].

При полном водонасыщении, как отмечается в ГОСТе 25100–82, лёссовые грунты переходят в плавунное состояние, и далее начинается разжижение грунта. Как известно [15], [16], под разжижением понимается переход грунта в текучее состояние, вне зависимости от причины такого изменения и величины последующих деформаций. При этом происходит разрушение связей между частицами в водонасыщенных дисперсных грунтах, грунт теряет свою несущую способность и переходит в состояние «тяжелой» жидкости. Необходимым условием для возникновения явлений разжижения грунта является полное или близкое к полному насыщение грунта водой.

Из таблицы (с. 811) видно, что содержание частиц с размерами менее 0,1 мм в грунтах основания камеры (скважины № 1, 3, 5) составляет 70–83 %. Таким образом, основную массу грунтов основания составляют лёссовидные пески и супеси. Относительно содержания воды в грунтах основания камеры шлюза № 5 необходимо отметить следующее. На момент строительства гидроузла предпроектными исследованиями было установлено, что основная часть днища камеры врежется в толщу водонасыщенных супесей нижебакинского горизонта. Грунтовые воды на участке шлюза № 5 были привязаны к пескам современного аллювия балки Солянки и песчано-глинистым отложениям нижнего горизонта бакинского яруса, андреевской свиты и онкофорового горизонта. Водоупором для них являлась мощная пачка глин в основании онкофорового горизонта и глины майкопской свиты.

Строительство гидроузла привело к формированию перепада между уровнями верхнего и нижнего бьефов — напор на гидроузле составил 9,4 м. Конструкцией, затрудняющей поступление воды из водохранилища верхнего бьефа на территорию гидроузла, является дамба с противοфильтрационным глинистым ядром. В основании верхней головы шлюза отсутствуют противοфильтрационные элементы — шпунт и др. С учетом характеристик грунтов под действием напора на шлюз вода из верхнего бьефа проникает в грунт основания шлюза, в котором формируется фильтрационный поток со значительным градиентом фильтрационного напора. Кроме того, георадарными исследованиями, проведенными в 2008 и 2019 гг. на правом крыле дамбы, отделяющей территорию гидроузла от водохранилища верхнего бьефа, зафиксирована зона ослабленного противοфильтрационного глиняного ядра. Возможно, это результат недостаточного уплотнения материала ядра при строительстве дамбы или его повреждения при проведении дальнейших ремонтно-строительных работ, что привело к развитию значительного потока фильтрации через правое крыло дамбы. В результате на участке правой пришлюзовой площадки гидроузла произошло выклинивание фильтрационных вод на дневную поверхность, площадка заболочена и заросла камышом. Фильтрационный поток под камерой шлюза имеет диагональную направленность, основная его часть проходит под секциями III, IV и V справа налево (рис. 7). В результате грунт основания камеры оказался полностью насыщен водой, находящейся под напором, о чем, в частности, свидетельствует самоизлив водно-грунтовой пульпы при бурении исследовательских скважин.

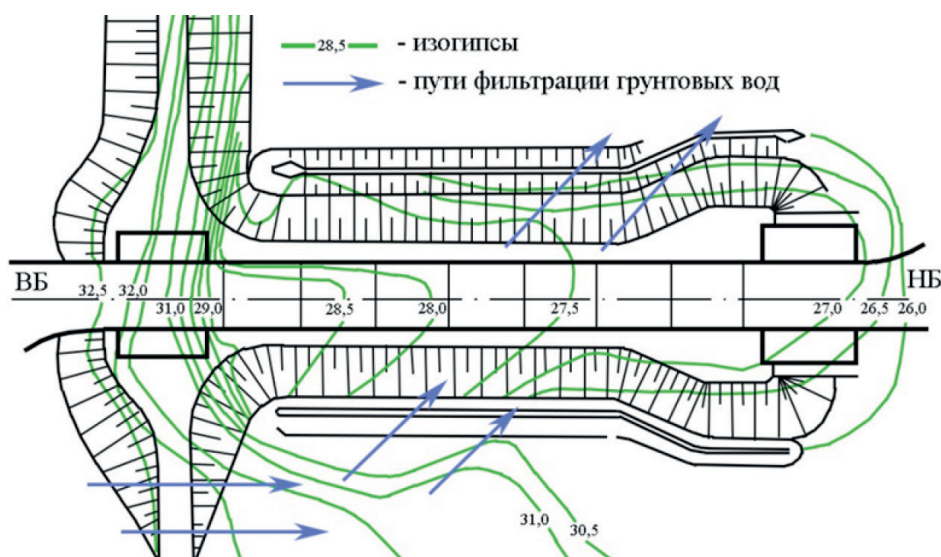


Рис. 7. Схема фильтрации в основании шлюза № 5

На основе данных о перемещениях конструкций шлюза можно сделать вывод о том, что суффозионные процессы в грунтах основания интенсифицировались начиная с 2005 г. Из-за некоторой разницы в характеристиках грунтов и в значительной степени из-за интенсивного бокового фильтрационного потока в основании секций III, IV, V осадки именно этих секций существенно

возросли. Это привело к нарушению герметичности осевой противофильтрационной шпонки в районе этих секций и возникновению гидравлической связи между водой в камере шлюза и потоками фильтрационных вод в грунтах основания. Наличие такой связи подтверждается изменением показаний пьезометров в процессе наполнения — опорожнения камеры и выходом воды в виде грифона на откос обратной засыпки в районе V секции. Все попытки эксплуатационных служб восстановить герметичность осевой шпонки и уменьшить интенсивность осадок центральных секций не имели успеха, непроектные осадки секций продолжились, что вызвало необходимость разработки проекта укрепления грунтов основания камеры с помощью создания грунтоцементных элементов методом струйной цементации.

Однако и в настоящее время после выполнения комплекса работ по укреплению грунтов основания камеры шлюза, как показали исследования 2018–2020 гг. [7], необходимых результатов по стабилизации положения камеры достичь не удалось и техническое состояние шлюза остается предаварийным, а уровень безопасности — неудовлетворительным. В итоге возникает закономерный вопрос: *как же все-таки остановить сверхнормативные осадки конструкций камеры шлюза*. В настоящее время мировая (в том числе и российская) строительная практика предлагает при строительстве и реконструкции сооружений на просадочных грунтах использовать следующие основные технологии [11], [13], [17]:

- предварительное уплотнение грунтов основания сооружения;
- прорезка просадочной толщи сваями;
- физико-химические методы закрепления лёссовых пород;
- водозащитные мероприятия.

Уплотнение грунтов предусматривает специальную подготовку основания перед строительством, что в случае шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала в настоящее время утратило актуальность. Интерес представляет методика прорезки просадочного слоя грунтов основания сваями [18]. Реализованная в 2016–2017 гг. для укрепления грунтов основания камеры шлюза № 5 струйная цементация [5] являлась попыткой опереть камеру шлюза на сваи из грунтоцементных элементов. Неудача этого проекта была обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, была использована двухкомпонентная технология Jet-2, предполагающая подачу в грунт одновременно со струей цементного раствора, как это происходит по однокомпонентной технологии Jet-1, струи сжатого воздуха¹. Данная технология предполагает создание грунтоцементных элементов большего диаметра. Однако плотность и прочность грунтоцемента при использовании технологии Jet-2 существенно ниже, чем при реализации технологии Jet-1. Во-вторых, и это является главным, не было учтено не только полное водонасыщение грунтов, но и значительные градиенты фильтрационного потока, который вымыл цементную смесь из массива грунтов, не позволив ей затвердеть и сформировать грунтоцементные элементы.

Более интересным для реализации представляется устройство в основании камеры буронабивных или щебеночных свай, заглубленных в глинистое основание, и опирание на них камеры шлюза. Буронабивные сваи² представляют собой вид свайных оснований, когда бетон заливается в устроенную в грунте скважину, в которой размещен армирующий каркас [19]. В слабых и водонасыщенных грунтах для фиксации сваи используются специальные опалубки или обсадные трубы, удерживающие бетон в скважине. После затвердения бетонной смеси обсадные трубы извлекаются или оставляются в скважине в качестве несъемной опалубки. Для повышения устойчивости используются буронабивные сваи с уширениями. В ситуации с гидроузлом шлюза № 5 следует учитывать, что скважины необходимо выполнять в днище камеры существующего шлюза. Для передачи нагрузки от веса камеры на сваи, по-видимому, необходимо наличие узла сопряжения основания камеры со сваями в виде верхнего уширения на свае (рис. 8).

¹ СП 45.133302017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализиров. ред. СНиП 3.02.01–87. Введ. 17 августа. 2017 г.

² СП 50-102–2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. Изд. офиц. М., 2004.

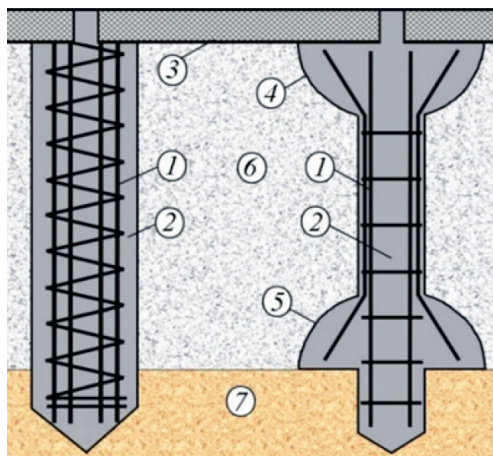


Рис. 8. Бутонабивные сваи обычные (а) и с уширением (б):
1 — арматурный каркас; 2 — бетон; 3 — днище камеры шлюза;
4 — верхнее уширение; 5 — нижнее уширение;
6 — лёссовый грунт; 7 — глинистый водоупор

Щебеночная свая представляет собой скважину, заполненную уплотненным щебнем. Технология изготовления такой сваи заключается в формировании скважины при помощи вибропогружателя с герметичным наконечником. Щебень подается в скважину по подводящей трубе и уплотняется вибратором. Поэтапно поднимаясь, вибропогружатель формирует тело сваи — рис. 9.

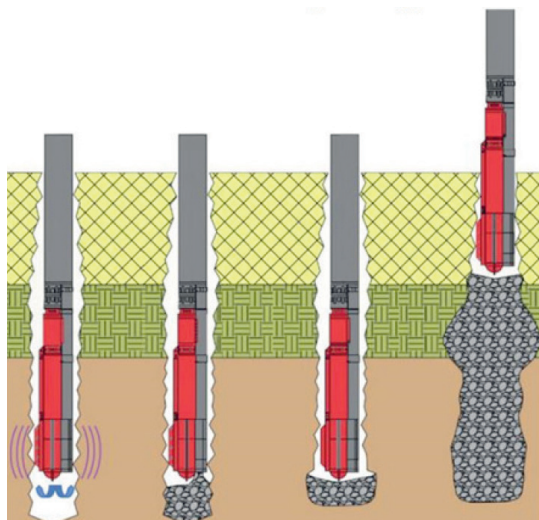


Рис. 9. Этапы формирования щебеночной сваи

Функцией щебеночных свай, при отсутствии обсадных труб, является увеличение прочностных характеристик грунтового массива. В мировой практике известны примеры наполнения скважин другими инертными материалами: цементно-песчаной или песчано-гравийной смесью, однако с учетом существующих в грунтах основания шлюза № 5 фильтрационных потоков с высокими градиентами напора такой наполнитель, скорее всего, будет достаточно быстро размыв.

Из физико-химических методов закрепления лёссовых пород наиболее известны два: силикатизация и термическое упрочнение. Силикатизация — это химическое инъекционное закрепление лёссов. В настоящее время различными производителями рекламируется значительное количество синтетических материалов, повышающих гидроизолирующие и прочностные свойства конструкций. Однако опыт химического закрепления больших массивов водонасыщенного грунта практически отсутствует. Инъектирование целесообразно производить двухкомпонентной смесью с очень малым

периодом затвердения (в пределах 1–2 мин). В противном случае подаваемые в грунт компоненты будут размыты фильтрационным потоком. Сроки сохранения прочностных свойств укрепленного инъекциями грунта должны быть сопоставимы с проектными сроками гарантированной эксплуатации судоходного шлюза — 50–100 лет, что также в настоящее время ни один производитель подтвердить не может.

Методы термического упрочнения грунтов основаны на изменении механических свойств грунтов в результате воздействия на них высоких температур в течение некоторого времени [20], [21]. Это может быть подача в грунт воздуха, нагретого до высоких (от 300 °С до 1400 °С) температур, либо подача в скважины горючей смеси (газообразной, жидкой, твердой пылевидной) и сжигание ее в грунте. Недостатком этих способов является необходимость достаточно длительного (в течение 5–10 дней) термического воздействия и, кроме того, они эффективны при влажности грунтов не более 50 %.

Одним из эффективных и результативных методов укрепления свойств грунтов основания камеры шлюза может служить использование водозащитных мероприятий. Для этого необходимо отделить весь массив грунтов, залегающих в основании шлюза, от окружающих пород, прекратив поступление в основание камеры фильтрационных потоков. Это можно реализовать устройством в грунте по периметру шлюза шпунтовой противофильтрационной завесы на всю глубину водонасыщенного грунта до слоя глинистого водоупора (на гидроузле шлюза № 5 это 10–12 м). Шпунт может быть металлическим (коробчатый, трубошпунт) либо из полимерных материалов. По-видимому, устройство противофильтрационной завесы на основе технологии «стена в грунте» с использованием цементной смеси окажется невозможным ввиду тех же причин, из-за которых не сформировались грунтоцементные элементы. После прекращения поступления грунтовых вод в основание камеры шлюза возможно проведение цикла работ по восстановлению положения камеры шлюза (подъем секций) и укреплению свойств грунта, обеспечивающему его несущую способность, одним из выбранных методов: сваи, цементация, силикатизация и др.

Заключение (Conclusion)

Комплекс работ по укреплению свойств грунтов основания камеры шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала, выполненных в 2016–2017 гг., не достиг планируемых результатов. Причиной этого является недостаточный учет свойств грунтового массива и фильтрационных процессов, проходящих в грунте. Грунт основания камеры изначально был насыщен грунтовыми водами, поскольку при строительстве шлюза расположили в тальвеге балки Солянка. В акте приемки построенного шлюза приемной комиссией было отмечено неудачное расположение шлюза — на траверзе балки, более целесообразно было бы расположить его ближе к склону балки. Создание перепада уровней между верхним и нижним бьефами гидроузлов привело к формированию в грунтах основания камеры напорного фильтрационного потока с существенными градиентами. Помимо этого грунты оказались изначально слабыми, преимущественно лёссового типа. Их водонасыщение привело к просадкам, существенной потере несущей способности и разжижению. Использование технологии двухкомпонентной струйной цементации Jet-2 в таких условиях не могло достичь желаемого результата, а именно формирования в основании камеры грунтоцементных стен, которые смогли бы передать нагрузку от веса камеры на устойчивые слои глинистого водоупора.

Для восстановления положения камеры, прекращения осадок или уменьшения их интенсивности целесообразно проработать с привязкой к объекту конкретные варианты водозащиты массива грунта, расположенного в основании камеры, и последующего повышения его несущей способности. Для этого предложено рассмотреть как минимум два подхода: формирование свай и силикатизация массива грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический отчет о строительстве Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина, Цимлянского гидроузла и оросительных сооружений 1949–1952 : в 5 т. — М: Госэнергоиздат, 1957. — Т. I : Общее описание сооружений. — 319 с.

2. *Коблев И. И.* Волго-Донской судоходный канал / И. И. Коблев, В. А. Кривошей, О. Ю. Шахмарданов, В. Я. Шестаков. — 2-е изд., испр. — Волгоград: Издатель, 2012. — 376 с.
3. Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях / Главное управление водных путей и гидротехнических сооружений Министерства речного флота РСФСР. — М.: Транспорт, 1981. — Ч. I: Гидротехническая. — 95 с.
4. Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости конструкций шлюзов № 5, 10, 11, 12, 13, 15, грунтовой дамбы № 74, напорного трубопровода № 34 насосной станции № 32 Волго-Донского судоходного канала с целью установления фактического технического состояния, запасов прочности и несущей способности сооружений и оборудования, разработка критериев безопасности: отчет о НИР. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2008. — 131 с.
5. Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Донского судоходного канала. I этап. Третий пусковой комплекс. Реконструкция гидроузла № 5, первая очередь. Разд. 4: Конструктивные и объемно-планировочные решения. Ч. 1: Гидротехнические сооружения. Кн. 2: Укрепление грунтов основания шлюза и дамбы № 74. — Волгоград: ООО «ССМ», 2013. — 324 с.
6. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Министерство транспорта РФ, Федеральное Агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот). — М., 2011. — 136 с.
7. Проведение наблюдений и специальных исследований за шлюзом № 5 после выполненных работ по укреплению грунтов основания для разработки рекомендаций по проведению работ по укреплению грунтов основания шлюза № 6 Волго-Донского судоходного канала: заключительный отчет по НИР. — СПб.: ФГБОУ ВО ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 211 с.
8. *Мустакимов В. Р.* Искусственные основания зданий и сооружений на просадочных грунтах: учеб. пособие для вузов / В. Р. Мустакимов. — М.: Изд-во Юрайт, 2023. — 220 с.
9. *Свидерских А. В.* Анализ изменения характеристик лессовых грунтов в зависимости от пористости / А. В. Свидерских, И. В. Носков // Вестник Евразийской науки. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 74.
10. *Ряченко Т. Г.* Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь) / Т. Г. Ряченко. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. — 287 с.
11. *Швецов А. Я.* Лёссы Алтая / А. Я. Швецов. — Барнаул: Изд-во «Новый формат», 2021. — 152 с.
12. *Выскребенцев В. С.* Прочностные свойства лёссовых просадочных грунтов при статических и динамических нагрузках / В. С. Выскребенцев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 3. — С. 38–42. DOI: 10.12737/issn.2071-7318.
13. *Трофимов В. Т.* Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский [и др.]. — 6-е изд., переработ. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.
14. *Моргунов К. П.* Гидравлика гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов. — СПб.: Лань, 2022. — 312 с.
15. *Моргунов К. П.* Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов, М. А. Колосов // Наука и техника. — 2022. — Т. 21. — № 3. — С. 201–210. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210.
16. *Моргунов К. П.* Влияние свойств грунтов в основании судоходных шлюзов на их эксплуатационные характеристики / К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 670–684. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-670-684.
17. *Игошева Л. А.* Обзор основных методов укрепления грунтов основания / Л. А. Игошева, А. С. Гришина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2016. — Т. 7. — № 2. — С. 5–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.
18. *Пьянков С. А.* Свайные фундаменты: учебное пособие / С. А. Пьянков. — Ульяновск: УлГТУ, 2007. — 105 с.
19. *Железняков В. А.* Увеличение несущей способности буронабивной сваи методом силикатизации / В. А. Железняков, А. П. Александров, А. С. Куликов // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 11 (71). — С. 321–328.
20. *Кондрашин К. Г.* Возможность термического укрепления грунтов / К. Г. Кондрашин, В. Н. Пилипенко, Е. М. Голубничева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: науч.-техн. журнал. — 2021. — № 2 (36). — С. 20–25.
21. *Юрданов А. П.* Термическое упрочнение грунтов в строительстве / А. П. Юрданов. — М.: Стройиздат, 1990. — 128 с.

REFERENCES

1. *Tekhnicheskii otchet o stroitel'stve Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala imeni V. I. Lenina, Tsimlyanskogo gidrouzla i orositel'nykh sooruzhenii 1949–1952 v pyati tomakh*. Vol. 1. M.: Gosenergoizdat, 1957.
2. Koble, I. I., V. A. Krivoshei, O. Yu. Shakhmardanov, and V. Ya. Shestakov. *Volgo-Donskoi sudokhodnyi kanal*. 2nd edition. Volgograd: Izdatel', 2012.
3. *Instruktsiya po nablyudeniya i issledovaniyam na sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh*. Vol. 1. M.: Transport, 1981.
4. *Provedenie issledovatel'skikh rabot, poverchno-teoreticheskikh raschetov prochnosti i ustoichivosti konstruktivnykh shlyuzov № 5, 10, 11, 12, 13, 15, gruntovoi damby № 74, napornogo truboprovoda № 34 nasosnoi stantsii № 32 Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala s tsel'yu ustanovleniya fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya, zapasov prochnosti i nesushchei sposobnosti sooruzhenii i oborudovaniya, razrabotka kriteriev bezopasnosti*. Scientific report. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2008.
5. *Razrabotka i realizatsiya kompleksnogo proekta rekonstruktsii Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala. I etap. Tretii puskovoi kompleks. Rekonstruktsiya gidrouzla № 5, pervaya ochered'*. Volgograd: OOO «SSM», 2013.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke bezopasnosti sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. M., 2011.
7. *Provedenie nablyudeniya i spetsial'nykh issledovaniy za shlyuzom № 5 posle vypolnennykh rabot po ukrepleniyu gruntov osnovaniya dlya razrabotki rekomendatsii po provedeniyu rabot po ukrepleniyu gruntov osnovaniya shlyuza № 6 Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala*. SPb.: FGBOU VO GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2020.
8. Mustakimov, V. R. *Iskusstvennye osnovaniya zdaniy i sooruzhenii na prosadochnykh gruntakh: uchebnoe posobie dlya vuzov*. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2023.
9. Sviderskikh, A. V., and I. V. Noskov. "Analysis of characteristics changes in the loess soils depending on porosity." *The Eurasian Scientific Journal* 11.2 (2019): 74.
10. Ryashchenko, T. G. *Regional'noe gruntovedenie (Vostochnaya Sibir')*. Irkutsk: IZK SO RAN, 2010.
11. Shvetsov, A. Ya. *Lessy Altaya*. Barnaul: Izd-vo «Novyi format», 2021.
12. Vyskrebentsev, V. S. "Structural behavior of loess subsiding soils under permanent and dynamic load." *Bulletin of Belgorod state technological university named after. V. G. Shukhov* 3 (2016): 38–42. DOI: 10.12737/issn.2071-7318.
13. Trofimov, V. T., V. A. Korolev, E. A. Voznesenskii, G. A. Golodkovskaya, Yu. K. Vasil'chuk, and R. S. Zian-girov. *Gruntovedenie*. 6th ed. M.: Izd-vo MGU, 2005.
14. Morgunov, K. P. *Gidravlika gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. SPb.: Lan', 2022.
15. Morgunov, K. P., and M. A. Kolosov. "Soil Liquefaction Problems in the Foundations Hydraulic Structures." *Science and Technique* 21.3 (2022): 201–210. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210.
16. Morgunov, Konstantin P. "Influence of the soils properties in the base of shipping locks on their performance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 670–684. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-670-684.
17. Igosheva, L. A., and A. S. Grishina. "Review of the basic methods of the ground improvement." *Construction and Geotechnics* 7.2 (2016): 5–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.
18. P'yankov, S. A. *Svaynye fundamenty*. Ul'yankovsk: UIGTU, 2007.
19. Zheleznyakov, V. A., A. P. Aleksandrov, and A. S. Kulikov. "Increasing the bearing capacity of a bored pile by silicatization." *Inzhenernyy vestnik Dona* 11(71) (2020): 321–328.
20. Kondrashin, K. G., V. N. Pilipenko, and E. M. Golubnicheva. "Vozmozhnost' termicheskogo ukrepleniya gruntov." *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Priaspia: nauchno-tekhnicheskii zhurnal* 2(36) (2021): 20–25.
21. Yurdanov, A. P. *Termicheskoe uprochnenie gruntov v stroitel'stve*. M.: Stroizdat, 1990.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 06 сентября 2023 г.
Received: September 6, 2023.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-820-833

FEATURES OF HYDRODYNAMIC CALCULATION OF HIGHLY LOADED PLAIN BEARINGS OF HEAVY SHIP'S GEARS

R. V. Kuznetsov^{1,2}, V. B. Chistov³, N. M. Vikhrov⁴

¹ — PJSC, Zvezda, St. Petersburg, Russian Federation

² — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

³ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

⁴ — JSC “KSZ”, St. Petersburg, Russian Federation

Despite the high level of modern vessel engineering development, there are a number of unresolved design and technological problems, the most urgent of which is the issue of unification of the main components and assemblies of the vessel. At the same time, an important and unresolved task is to create a unified image of the ship's reverse gear for the needs of the domestic civilian fleet and navy. The object of study is highly loaded bimetallic plain bearings, which are elements of the “heavy” marine reverse gears of a new generation. As part of the work, a hydrodynamic calculation that refines the parameters of the plain bearings of a highly loaded marine transmission at the stage of a prototype production is performed. The applicability of the State Standard ISO 7902 methodology to the products under consideration is assessed, as well as the approximation of the performance characteristics of bearings using interpolation of two variables function is performed. The rationale for the coverage angle and the location of the pockets for supplying lubrication of bearings taking into account the thermal and viscous properties of the oil is presented. Calculations of the parameters of the critical thickness of the lubricating layer, the maximum allowable specific load and the maximum allowable temperature of bearings are performed. Based on the results of the calculations, an additional assessment for the compliance of bearings with the requirements of State Standard ISO 7902 in terms of bearing capacity and stability parameters is carried out. The comparison of the obtained results with the data of the preliminary calculation performed at the stage of the technical project is given. It is revealed that when calculating dynamically loaded plain bearings, it is necessary to take into account a number of additional factors, namely the magnitude of the relative eccentricity and relative clearance. The risks of bearings failure in the process of dynamic loading are determined. The result of the work is the correction of the geometric parameters of the plain bearings of the marine reverse gear unit in order to increase its reliability and the overhaul interval.

Keywords: reverse gear, plain bearing, hydrodynamic calculation, specific load, bimetal.

For citation:

Kuznetsov, Ruslan V., Valentin B. Chistov, and Nikolay M. Vikhrov. “Features of hydrodynamic calculation of highly loaded plain bearings of heavy ship's gears.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 820–833. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-820-833.

УДК 621.83.061.4

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ СУДОВЫХ РЕДУКТОРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Р. В. Кузнецов^{1, 2}, В. Б. Чистов³, Н. М. Вихров⁴

¹ — ПАО «ЗВЕЗДА», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом исследования является ряд конструкторско-технологических вопросов, наиболее актуальными из которых являются унификация основных узлов и агрегатов судна и создание единого облика судового реверс-редукторного агрегата, предназначенного для отечественного гражданского и военного морского флота. Объектом исследования в данной работе являются высоконагруженные биметаллические подшипники скольжения, являющиеся элементами «тяжелых» судовых реверс-редукторных передач нового поколения. В работе выполнен гидродинамический расчет, уточняющий параметры подшипников скольжения высоконагруженной судовой трансмиссии на этапе производства опытного образца. Дана оценка применимости методики ГОСТ ИСО 7902 к рассматриваемым изделиям, а также выполнена аппроксимация рабочих характеристик подшипников с помощью интерполяции функции двух переменных. Представлено обоснование величины угла охвата и расположения карманов подвода смазки подшипников (в том числе с учетом теплофизических и вязкостных свойств масла). Выполнены расчеты параметров критической толщины смазочного слоя, максимально допустимой удельной нагрузки и предельно допустимой температуры подшипников. На основе результатов расчетов дана дополнительная оценка на соответствие подшипников требованиям ГОСТ ИСО 7902 в части параметров несущей способности и устойчивости. Приведено сравнение полученных результатов с данными предварительного расчета, выполненного на этапе технического проекта. Выявлено, что в процессе расчета динамически нагруженных подшипников скольжения необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, а именно величину относительного эксцентриситета и относительного зазора. Определены риски выхода из строя подшипников в процессе динамического нагружения. Результатом работы является корректировка геометрических параметров подшипников скольжения судового реверс-редукторного агрегата с целью повышения его надежности и увеличения межремонтного интервала.

Ключевые слова: реверс-редукторная передача, подшипник скольжения, гидродинамический расчет, удельная нагрузка, биметалл, газотурбинные двигатели, динамическое нагружение.

Для цитирования:

Кузнецов Р. В. Особенности гидродинамического расчета высоконагруженных подшипников скольжения тяжелых судовых редукторных передач / Р. В. Кузнецов, В. Б. Чистов, Н. М. Вихров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 820–833. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-820-833.

Введение (Introduction)

В течение последних двух десятилетий в России активно разрабатывается и реализуется ряд перспективных проектов судов широкого спектра назначения [1]. На базе высокоэкономичных газотурбинных двигателей четвертого поколения проектируется значительное количество силовых агрегатов широкого диапазона мощностей для судов гражданского и военного назначения. При этом к актуальным проблемам, оказывающим влияние на сроки строительства и ремонта судов, относится вопрос конструкторско-технологической унификации типовых узлов и компонентов изделий [2].

Одной из важных нерешенных задач является создание унифицированного реверс-редукторного агрегата для отечественного ВМФ [3]. Практически данную задачу уже более десяти лет пытаются реализовать специалисты Санкт-Петербургского судостроительного предприятия ПАО «Звезда», имеющего богатый опыт создания как отдельных реверс-редукторных агрегатов типа РРД12000 и РП6000, так и межредукторных передач в составе звездообразных дизельных двигателей семейства М500. В настоящее время предприятие значительно расширяет компетенции в части проектирования и изготовления новых редукторных комплексов различного типоразмера, в том числе для корабельных ГТД М90ФР, М70ФРУ, М70ФРУ-Р, М70ФРУ-2 и М75РУ. При этом, ввиду ограниченного научно-практического задела [4] и сжатых сроков реализации новых проектов, нередко облик разработанной трансмиссии требует дополнительной корректировки в процессе создания или испытания ее опытного образца.

Целью данной работы является уточнение гидродинамического расчета подшипников скольжения опытного судового редукторного агрегата для определения их надежности и устойчивости работы в процессе динамического нагружения.

Методы и материалы (Methods and materials)

Расчет подшипников выполняется для номинального режима работы [5] проектируемого редукторного комплекса. В качестве исходных данных в выполненной работе были приняты расчетные нагрузки на подшипники редуктора, полученные на основе расчета зубчатых зацеплений [6].

Применимость к расчету ГОСТ ИСО 7902. Данный ГОСТ предназначен для определения размеров и оптимизации параметров стационарно нагруженных подшипников скольжения, применяемых в турбинах, генераторах, электродвигателях, зубчатых передачах, прокатных станах, насосах и других механизмах. Важным фактором применимости методики ГОСТа ИСО 7902 является то, что метод не распространяется на условия динамического нагружения, когда значение и направление нагрузки, изменяемые в зависимости от времени, могут быть результатом влияния вибрации и неустойчивости быстровращающихся валов.

Согласно ГОСТ ИСО 7902–2001, применимость метода проверяют с помощью числа Рейнольдса для подтверждения ламинарного режима течения в смазочном зазоре. По основным параметрам: числу Рейнольдса и удельной нагрузке на подшипник, для всех подшипников выполняются требования применимости ГОСТа ИСО 7902, за исключением параметров карманов для смазки подшипников шестерни и колеса второй ступени. Тем не менее следует отметить, что окружная скорость подшипников в редукторе на номинальном режиме составляет 22–26 м/с за исключением входного (45 м/с) и выходного (6,6 м/с) подшипников. Таким образом, все рассчитываемые подшипники кроме выходного относятся к высокоскоростным. Поскольку для высокоскоростных подшипников нельзя исключить возникновение неустойчивости движения центра вала относительно подшипника, а соответствующие расчеты не обеспечиваются ГОСТом ИСО 7902 и являются сложной научной задачей, рекомендуется экспериментальная проверка устойчивости работы подшипников на эксплуатационных режимах. В данном случае особую важность имеет проверка устойчивости работы входных подшипников редуктора [7].

Параметры материала подшипника. В качестве материала плакирующего (рабочего) слоя был выбран баббит Б83 (ГОСТ 1320–74 (ИСО 4383–91)). Рекомендуемые параметры применения используемого материала приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Рекомендуемые параметры применения баббита Б83

Характеристика нагрузки	Спокойная, ударная
Удельное давление p , кгс/см ²	150, 100
Окружная скорость v , м/с	50
Напряженность работы PV	750, 500
Рабочая температура, °C	70

Выбор материала был обусловлен расчетными нагрузками и массогабаритными характеристиками подшипников, в том числе толщины плакирующего слоя.

Предельно допустимая критическая толщина смазочного слоя. ГОСТ ИСО 7902 устанавливает эмпирические допустимые значения критической толщины смазочного слоя h_{lim} , максимальной, допустимой удельной нагрузки на подшипник p_{lim} и предельно допустимой температуры подшипника T_{lim} , представляющие собой геометрически и технологически зависимые эксплуатационные пределы трибологической системы подшипников скольжения. Предельно допустимая критическая толщина смазочного слоя определяется по формуле

$$h_{lim} = Rz_B + Rz_j + \frac{By}{2} + \frac{y}{2} + h_{waveff},$$

где Rz_B — максимальная высота неровностей поверхности скольжения подшипника, мкм;

Rz_j — максимальная высота неровностей поверхности скольжения вала, мкм;

y — средний прогиб, мкм;

By — смещение по длине подшипника, мкм.

Средний прогиб y принимаем равным нулю ввиду того, что зубчатые колеса отличаются высокой жесткостью на изгиб [9]. Поскольку смещение по длине подшипника и абсолютная волнистость не регламентированы требованиями конструкторской документации, вместо них используем отклонение профиля продольного сечения TFP и половину отклонения от круглости TFR , причем оба параметра суммируются для вала и подшипника:

$$B_y = TFP_j + TFR_B;$$

$$h_{wav} = \frac{TFP_j + TFR_B}{2}.$$

Особенность расчета предельной абсолютной волнистости по ГОСТ ИСО 7902 состоит в том, что она определяется по эффективной волнистости через соотношение

$$h_{waveff} = h_{wav} \frac{E}{G},$$

где G и E — параметры, определяемые по относительному эксцентриситету, относительной ширине подшипника и числу волн i на периферии поверхности скольжения вала и подшипника.

Параметр G задан для относительного эксцентриситета более 0,85. Поскольку в данном расчете относительный эксцентриситет для всех подшипников составляет 0,48–0,7, исходя из характера зависимостей, приведенных в ГОСТ ИСО 7902, принимаем $G = 1$.

Аппроксимация характеристик подшипников. Использование ГОСТа ИСО 7902 подразумевает снятие основных параметров подшипника с диаграмм или из таблиц. Снятие параметров вручную с диаграмм значительно увеличивает трудоемкость расчетов, учитывая, что они итерационные и требуется рассчитать весь объем подшипников редукторного комплекса, причем для каждого выполнить несколько расчетов с различными маслами и параметрами.

Поскольку в таблицах параметры заданы с достаточно большим шагом, требуется применение интерполяции функции двух переменных. В первоначальной версии расчета была использована линейная интерполяция, но анализ результатов показал высокий разброс результатов расчета, оцениваемых по характеру зависимостей температуры от угла охвата подшипника, а также по отклонению результата применения прямой $So(\epsilon)$ и обратной $\epsilon(S_o)$ интерполированных функций от исходного значения S_o :

$$\delta = \frac{S_o(\epsilon(S_o)) - S_o}{S_o} \cdot 100\%.$$

Отклонение δ превысило 8 %.

Было выявлено, что зависимости для числа Зоммерфельда, удельного коэффициента трения от относительного эксцентриситета значительно ближе к линейным при логарифмической шкале по числу S_o . В качестве простейшего решения проблемы повышения точности интерполяции была использована линейная интерполяция функции $\ln(S_o)$ с последующим обратным взятием экспоненты от результата. Данная интерполяция в данной работе условно называется логарифмической, но, по сути, представляет собой линейную. Использование логарифмической интерполяции позволило решить проблему высокого разброса результатов — отклонение δ уменьшилось на 3 %.

Сравнение аппроксимаций функций числа Зоммерфельда от относительной длины подшипника для угла охвата 360° приведено на рис. 1. Графики линейной аппроксимации показаны жирными линиями, логарифмической — тонкими; исходные точки, взятые из таблиц, показаны кружками.

Видно, что для значений ϵ , совпадающих с табличными, логарифмические и линейные зависимости практически совпадают, но для $\epsilon = 0,3$ там, где результат определяется интерполяцией по ϵ , линия для линейной зависимости проходит выше логарифмической.

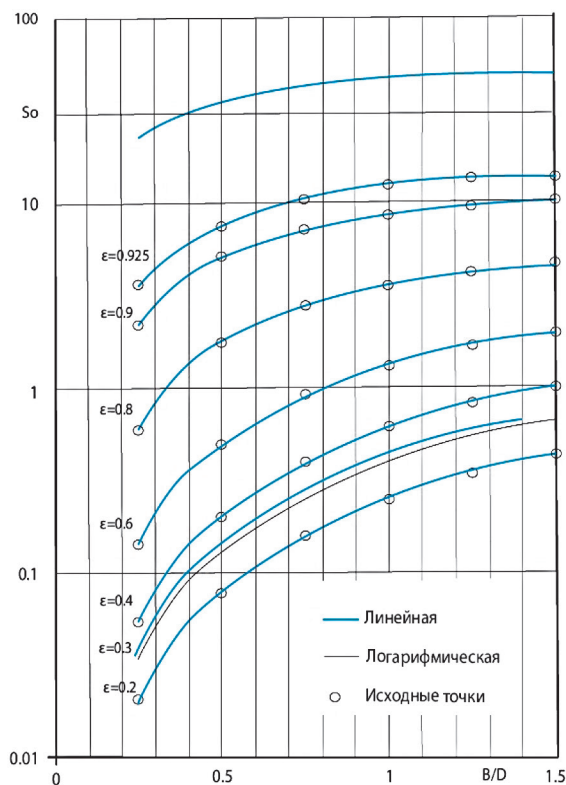


Рис. 1. Число Зоммерфельда как функция относительной длины подшипника для угла охвата 360°

Для того чтобы объяснить и оценить это отклонение, на рис. 2 построены функции $S_0(\epsilon)$ по линейной и логарифмической интерполяции. Из графиков видно, что логарифмическая интерполяция соединяет исходные точки прямыми линиями (в логарифмической системе координат), а линейная дает на каждом участке «выпуклые кривые», значительно завышающие результат. Поскольку в логарифмических координатах расстояние между кривыми сжимается, дополнительно по отдельной оси построено отношение двух интерполяций $X = \frac{S_{0, \text{лин}}}{S_{0, \text{лог}}}$, которое показывает, что разность между зависимостями достигает 18%.

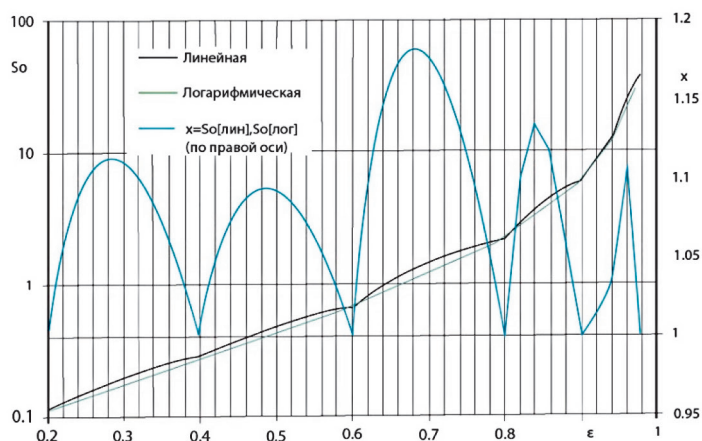


Рис. 2. Функция $S_0(\epsilon)$ и отношение результатов двух интерполяций X

Следует отметить, что логарифмическая интерполяция не является идеальной, поскольку, по сути, является такой же линейной, но построенной в логарифмических координатах. Ее преимущество объясняется только тем, что эта формула лучше описывает зависимость $S_0(\epsilon)$, но, как видно из графиков, логарифмическая зависимость тоже имеет изломы, поскольку проводится только через пары смежных точек. Применение более сложных видов двумерной интерполяции требует дополнительных исследований и ввиду малого количества исходных точек и резких перепадов зависимостей в любом случае будет очень сложно получить высокую точность. Поскольку при расчете используется обратная зависимость $\epsilon(S_0)$, для оценки погрешности δ в данном расчете была построена функция $\epsilon(S_0)$ — рис. 3. При этом относительная ширина подшипника была принята расчетной: $B/D = 0,604$. Выбранный диапазон S_0 и ϵ соответствует настоящему расчету.

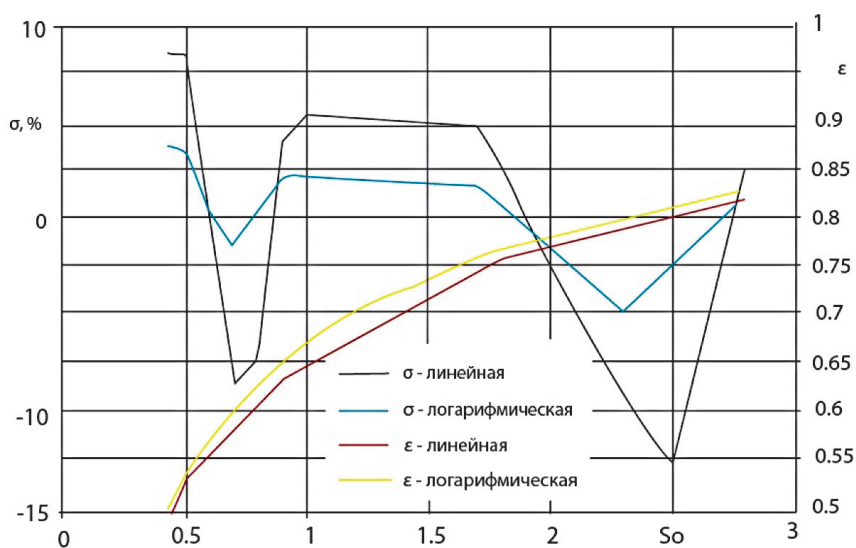


Рис. 3. Функция $\epsilon(S_0)$ и оценка погрешности δ

Поскольку зависимость обратная, логарифмическая интерполяция лежит выше и это закономерный результат. Из графиков видно, что погрешность, т.е. отклонение S_0 после применения обратной $\epsilon(S_0)$ и прямой $S_0(\epsilon)$ интерполированных функций, в среднем не превышает 3%, но в отдельных точках достигает 5%. Ввиду указанных ранее причин получить более высокую точность интерполяции по имеющимся таблицам весьма затруднительно, поэтому принято решение далее использовать логарифмическую интерполяцию.

Обоснование величины угла охвата подшипников. Согласно ГОСТу ИСО 7902, требуется задать угол охвата подшипника. Физическая сущность данного параметра недостаточно точно формулируется в различных источниках, а в ГОСТе нет четких рекомендаций по назначению угла охвата. Сущность проблемы состоит в том, что углы начала и конца масляного клина, которые являются основополагающими для расчетов подшипников скольжения, зависят от множества факторов. Угол начала масляного клина определяется по условию масляного голодания или по расположению кармана подвода смазки, угол конца масляного клина — по условию кавитации или тоже по расположению кармана. В граничные условия уравнений распределения давления в масляном клине в ГОСТе ИСО 7902 заложены ограничения, которые выражаются в характеристике «угол охвата подшипника», который при этом в общем случае не равен протяженности масляного клина, поскольку последний не может значительно превышать 180° .

В источнике [10, с. 191] даны следующие рекомендации по назначению угла охвата: «В подшипниках двигателей внутреннего сгорания, у большинства турбин, компрессоров, насосов и т.д. делают обычно одно-два отверстия или одну канавку, предполагая, что эти отверстия или канавка расположены в нерабочей части вкладыша. Поэтому расчет ведут, допуская, что начало смазочного слоя, если не сделано специальных оговорок, соответствует оптимальным условиям

подачи и достаточному количеству подаваемого масла, благодаря чему может быть реализована максимальная несущая способность слоя. На основании расчетной схемы, весьма близкой к действительности при указанных условиях, считается, что в подшипнике, полностью охватывающем шип с постоянным зазором по всей окружности, смазочный слой при всех эксцентриситетах начинается в месте наибольшего зазора (т. е. в этом случае $\varphi_1 = 0$)».

В практике расчета подшипников двигателей внутреннего сгорания обычно используются значения углов охвата 120° и в некоторых случаях 180° . Согласно примерам, приведенным в [10], можно сделать вывод, что для стационарно нагруженных подшипников турбин допускается принимать 180° . Для оценки степени влияния угла охвата на результаты расчета был выполнен расчет наиболее ответственного входного подшипника редуктора с различными значениями углов охвата, результаты которого приведены в табл. 2. Видно, что с увеличением угла охвата увеличивается расход смазочного материала из-за гидродинамического давления Q_3 , при этом расход смазочного материала из-за давления подачи Q_p незначительно уменьшается.

Таблица 2

Результаты расчета входного подшипника редуктора с различными значениями углов охвата

A	T_{ex}	P_{thf}	Q_3	Q_p	ε	h	h_{lim}
$^\circ$	$^\circ\text{C}$	кВт	м ³ /ч	м ³ /ч	—	мкм	Мкм
360	74,8	34,61	2,06	0,56	0,50	92	14
180	76,5	61,66	1,58	0,62	0,52	88	14
150	80,9	29,58	1,26	0,66	0,54	84	14
120	83	26,58	0,89	0,71	0,57	79	14
90	84	22,22	0,53	0,76	0,61	71	14

Примечание. В таблице для подшипников без карманов принимаем угол охвата 180° , для подшипников с карманами принимаем угол охвата в зависимости от геометрических параметров карманов.

Тепловыделение P_{thf} с увеличением угла охвата растет, но из-за роста расхода смазки температура на выходе подшипника T_{ex} уменьшается. Минимальная толщина смазочного слоя h_{min} с увеличением угла охвата увеличивается. Таким образом, можно сделать вывод о том, что с увеличением угла охвата увеличивается несущая способность как по температуре на выходе, так и по толщине смазочного слоя. При этом необходимо отметить, что с увеличением угла охвата уменьшается относительный эксцентриситет ε . Для высокоскоростных подшипников уменьшение относительного эксцентриситета может быть опасным, поскольку, согласно данным В. А. Дмитриева [11, с. 636] «нормально относительный эксцентриситет должен быть более 0,55...0,6, так как при меньших значениях работа подшипника может оказаться неустойчивой и возникает опасность появления автоколебаний». Из результатов расчета видно, что входной подшипник работает в зоне опасных значений относительного эксцентриситета, причем при угле охвата 120° он равен 0,54, а при 360° — 0,5.

Расположение карманов для подвода смазки. Подшипники шестерни и колеса второй степени имеют карманы для подвода смазки. Это отражается на угле охвата подшипника (угол охвата не более угла между кромками карманов) и на расходе масла через подшипник.

В ГОСТе ИСО 7902 предусмотрены формулы для расхода масла через карманы при их симметричном расположении под углами 90° относительно действующего усилия и относительной ширине в диапазоне от 0,05 до 0,7. На подшипниках шестерни второй ступени карманы расположены под углами 75° и 104° , а у выходного колеса на номинальном режиме при работе от ГТД под углами 92° и 88° . При работе от гребного электродвигателя углы достигают 47° и 133° , но нагрузка состав-

ляет менее четверти номинальной. Положительным фактором является расположение большего угла со стороны вращения, так как наиболее протяженная часть масляного кармана находится до линии действия нагрузки по направлению вращения, а за линией действия нагрузки достаточно быстро убывает до нуля на участке протяженностью 40–60°. В этом случае несущая способность подшипника не должна снижаться из-за карманов при условии, что они не попадут в зону масляного клина. Имеется один подшипник, у которого угол от середины кармана до линии действия нагрузки составляет 75° по направлению вращения.

Согласно [10], угол охвата рассчитывается как угол между кромками карманов при центральном относительно карманов приложении нагрузки, и масляный клин в этом случае начинается от края кармана. Если в рассматриваемом случае угол от края кармана до вектора усилия составляет 65°, то условный угол охвата (для обеспечения одинаковой протяженности масляного клина) соответствует $2 \cdot 65^\circ = 130^\circ$. Таким образом, для данного подшипника принимаем ближайший угол охвата, равным 120°. Учесть влияние нестандартного расположения кармана на расход масла через стенки кармана в данном случае не представляется возможным. Также следует отметить, что относительная ширина карманов составляет $\bar{b}'_p = 0,73$ для шестерен второй ступени и $\bar{b}'_p = 0,82$ для выходного колеса, т. е. выходит за пределы диапазона от 0,05 до 0,7 применимости формулы (11) ГОСТ ИСО 7902. Поскольку за пределами диапазона применимости погрешность формул может резко возрасти, в тех случаях, когда относительная ширина карманов $\bar{b}'_p$ превышала 0,7, параметр qr рассчитывался исходя из $\bar{b}'_p = 0,7$.

Ввиду указанных ранее причин расчетный расход масла через карманы носит оценочный характер, но поскольку расход смазочного материала, из-за давления подачи, на который оказывают влияние карманы, составляет всего 40% от общего расхода масла, влияние неточности определения расхода масла через карманы не является определяющим.

Теплофизические свойства масла. Зависимости от температуры плотности и теплоемкости масла турбинного ТП-46. Важнейшее влияние на результаты расчета оказывает температурная зависимость вязкости масла. Сведения о температурных зависимостях плотности и теплоемкости в ГОСТ 9972–74 отсутствуют, а для теплоемкости отсутствует даже значение в одной точке. По причине того, что температурные зависимости плотности и теплоемкости не оказывают значительного влияния на результаты, в данном расчете для масла ТП-46 использованы зависимости для масла М14Г2ЦС из [12], смещенные на постоянную величину, чтобы соответствовать маслу ТП-46 в одной известной точке.

Согласно ГОСТу 9972–74, масло ТП-46 имеет плотность 0,895 г/см³ при 20 °С. Масло М14Г2ЦС при той же температуре имеет плотность, близкую 901 кг/м³. Таким образом, в расчете использована зависимость плотности масла М14Г2ЦС от температуры, уменьшенная на 6 кг/м³. Поскольку в данном ГОСТе отсутствуют любые данные о теплоемкости масла ТП-46, в качестве опорного использовано справочное значение теплоемкости масла турбинного УТ при 50 °С:

$$c = 0,464 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 4,1868 \cdot 1000 = 1942 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

При такой же температуре масло М14Г2ЦС имеет теплоемкость 1988 Дж/(кг·К). Поэтому используем температурную зависимость теплоемкости масла М14Г2ЦС, уменьшенную на 46 Дж/(кг·К).

Вязкостная характеристика масла турбинного ТП-46. В соответствии с ГОСТ 9972–74 масло ТП-46 имеет вязкость кинематическую при 40 °С от 61,2 до 74,8 мм²/с и индекс вязкости не менее 90. В соответствии с СТО 56194358–013–2012 ООО «Производство Завод имени Шаумяна» масло ТП-46 имеет вязкость кинематическую при 40 °С, равную 41–50 мм²/с и 6–8 мм²/с и индекс вязкости не менее 90. Следует отметить, что, согласно требованиям обоих ГОСТов, индекс вязкости должен быть не менее 90, но по ГОСТ 9972–74 такой индекс вязкости достигим только при максимальных значениях вязкости при 100 °С (диапазон возможных значений индекса вязкости в заданных пределах для ν от –16 до 96). Предельные значения индекса вязкости по СТО 56194358–013–2012 составляют от 85 до 146°, что соответствует требованию о том, чтобы индекс вязкости был не менее 90.

Для расчета установлена предельная характеристика исходя из значения коэффициента кинематической вязкости при 100 °С, равного 8 мм²/с, и индекса вязкости 90 (данные параметры одинаковы для ГОСТа 9972–74 и для СТО 56194358–013–2012). В результате получим, что коэффициент кинематической вязкости при 40 °С должен быть равен 63,5 мм²/с. Для проверки необходимо вычислить индекс вязкости по методу А, согласно ГОСТу 25371–97 (ИСО 2909–81):

$$\nu l = \frac{L - U}{L - H} \cdot 100 = \frac{100 - 63,5}{100 - 59,6} \cdot 100 = 90,347.$$

На основе сравнения температурных зависимостей вязкости масла ТП-46, согласно принятой зависимости и данным расчета [13], с одной стороны, видно, что эта зависимость дает более высокие значения ν при высоких температурах, и это идет «в запас», а, с другой стороны, зависимость, полученная из расчета [13], дает более высокие значения ν при низких температурах. Это свидетельствует о том, что соответствующий ей индекс вязкости ниже 90, что противоречит ГОСТу 9972–74.

Уточнение нагрузки на подшипники выходного зубчатого колеса. Особенностью нагружения подшипников выходного зубчатого колеса рассматриваемого редукторного комплекса является то, что к выходному фланцу редуктора крепится упругая муфта, часть массы которой воспринимается подшипниками зубчатого колеса. Ввиду несимметричности нагружения подшипников необходимо определить, насколько изменится на них распределение нагрузки.

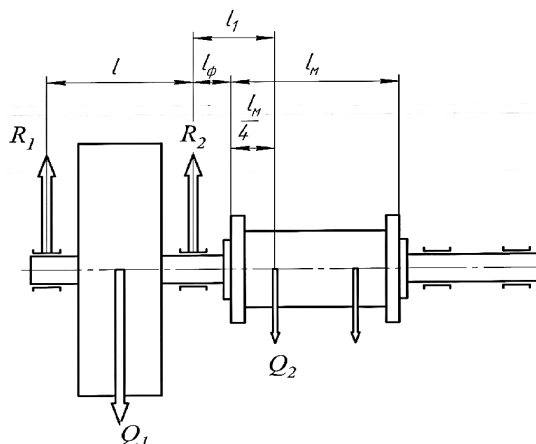


Рис. 4. Расчетная схема

Расчетная схема подшипников выходного зубчатого колеса приведена на рис. 4. Поскольку муфта является упругой и допускает радиальное смещение, примем, что ее масса поровну делится между валом редуктора и следующим валом, который крепится к муфте. Ввиду отсутствия данных о том, где расположен центр масс половины муфты, примем, что он расположен на расстоянии четверти длины муфты от фланца. Исходные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные

Параметр	Значение
Усилие в зацеплении, кН	$Q_0 = 815$
Расстояние между серединами подшипников, мм	$l = 1120$
Масса муфты, т	$m_2 = 1,55$
Расстояние от середины подшипника до фланца муфты, мм	$l_\phi = 513$
Длина муфты, мм	$l_m = 1070$
Масса зубчатого колеса в сборе, т	$m_1 = 7,109$
Угол между направлением усилия в зацеплении и вертикалью, °	$\alpha = 22,4$

Учет потерь давления в смазочной системе. Дополнительно к методике ГОСТа ИСО 7902 в расчете частично учитывается сопротивление элементов смазочной системы. При правильно выбранных проходных сечениях оно не должно оказывать заметного влияния на работу подшипников. Поэтому целью расчета является проверка выбранных проходных сечений отверстий для смазки в подшипниках и рекомендации для выбора проходного сечения трубки, подающей масло непосредственно к подшипнику. Расчет масляных магистралей в задачи расчета не входит.

Подача масла в подшипники второй ступени, имеющие карманы, производится через окна. Для унификации расчетов всех подшипников в расчете окна заменены на совокупность отверстий эквивалентного диаметра, имеющих идентичный суммарный периметр и площадь проходного сечения. Карманы подшипников шестерни имеют прорези для подачи масла длиной $l = 50$ мм и шириной $w = 12$ мм.

Периметр окна, мм

$$\Pi = 2l + 2w = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 12 = 124.$$

Площадь, мм²

$$F = lw = 50 \cdot 12 = 600.$$

Эквивалентный диаметр, мм

$$D_3 = 4 \frac{F}{\Pi} = 4 \cdot \frac{600}{124} = 19,355.$$

Число отверстий эквивалентного диаметра

$$n = \frac{\Pi}{\pi d} = \frac{124}{19,35\pi} = 2,0393.$$

Таким образом, два отверстия диаметром 19 мм с гидравлической точки зрения эквивалентны прорези 12×50 мм. Аналогично получено, что прорези карманов подшипников колеса, размер которых равен 20×70 , эквивалентны двум отверстиям диаметром 30 мм.

Обсуждение результатов (The discussion of the results)

Потери давления в отверстиях подвода масла не превышают 1300 Па, размеры отверстий достаточны. Также были рассчитаны условные трубки для подвода масла длиной 3 м и внутренним диаметром 24 мм. Ввиду отсутствия точных данных о длине трубок, одинаковые размеры были заложены для всех подшипников. Расчет показал, что для всех подшипников потери давления в трубках длиной 3 м и внутренним диаметром 24 мм не превышают 13200 Па. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что на номинальном режиме при температуре масла на входе в подшипники 50 °С диаметр трубок, равный 24 мм, является достаточным. Наибольшие потери получены в трубке подвода масла к подшипнику шестерни подвода от ГТД.

Несущая способность подшипников, выполненных из мягких и пластичных материалов (баббиты), ограничивается наступающим при повышенных температурах размягчением материала и разрушением его под действием высоких давлений в масляном слое до возникновения граничной смазки [14]. Рекомендуемое удельное давление применения баббита Б83, согласно ГОСТу 1320–74 (ИСО 4383–91), составляет не более 15 МПа, а рабочая температура — 70 °С (см. табл. 1). Подшипники имеют значительный запас как по величине удельного давления, так и по минимальной толщине смазочного слоя. Предельные значения h_{lim1} и h_{lim2} определены, соответственно, по табл. 1 и зависимости (1) в соответствии с ГОСТом ИСО 7902. Параметры несущей способности подшипников приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры несущей способности подшипников

Подшипник, расположение	$\dot{p}$, МПа	$h_{\min}$, мкм	$h_{\lim1}$, мкм	$h_{\lim2}$, мкм	T_{ex} , °С	T_{eff} , °С	Q_3 , л/мин	Q_p , л/мин
Шестерня входная от ГТД	1,24	89	14	16	77	63	26,2	9,9
Колесо первой ступени	1,19	86	11	16	72	61	21,9	9,6
Шестерня второй ступени	2,51	47	11	16	88	69	8,5	4,0
Шестерня второй ступени	2,51	57	11	16	76	63	17,8	3,4
Колесо выходное	2,10	49	11	16	60	55	12,0	7,9
Шестерня входная от ГЭД	1,63	51	11	16	59	54	9,2	9,3
Шестерня привода МРП	2,40	51	11	16	70	60	19,0	12,3
Шестерня МРП левая	1,02	91	11	16	70	60	19,8	9,4
Колесо МРП левое	1,87	68	11	16	71	60	22,1	10,7
Колесо МРП правое	1,89	66	11	16	69	60	21,0	10,9
Шестерня МРП правая	1,02	91	11	16	70	60	19,8	9,4

Расчетные температуры масла на выходе из подшипника не превышают предельную температуру масла на выходе из подшипника по ГОСТ ИСО 7902 при циркуляционном смазывании $T_{\lim} = 125$ °С при отношении общего количества смазочного материала к расходу смазки за минуту более пяти. При этом следует отметить, что расчетные температуры масла на выходе из подшипника превышают рекомендованные ГОСТ 1320–74 для баббита Б83, но температура, равная 70 °С, не является предельной для подшипников. Несмотря на то, что для редукторов в литературе по деталям машин обычно рекомендуют назначать рабочие температуры так, чтобы средняя не превышала 50–60 °С [11], в двигателях внутреннего сгорания обычным для подшипников скольжения является уровень температур порядка 100 °С. Для баббита Б83 сведения о предельной температуре приведены в [10, с. 329]: «предельной температурой для баббитов принимают ту, при которой его твердость в толстом слое, по рекомендации проф. А. К. Зайцева, падает ниже 12 по Бринелю». Для баббита Б83 эта температура составляет 115 °С.

В ГОСТ ИСО 7902 нет ограничений на относительный эксцентриситет, поскольку этот ГОСТ предназначен для подшипников, работающих в стационарных условиях. Формально применимость данного ГОСТа ограничивается ламинарным режимом течения в смазочном слое, оцениваемом по числу Рейнольдса. По результатам расчета даже для входного подшипника имеется двойной запас по числу Рейнольдса в смазочном слое. Тем не менее в ГОСТе ИСО 7902 отмечается, что данный стандарт неприменим на режимах «вибрации и неустойчивости быстровращающихся валов». При этом в нем отсутствуют методы расчета устойчивости положения центра вала в подшипнике, что, вероятно, связано с тем, что устойчивость подшипника в целом определяется всей динамической системой, включающей вал, корпусные детали и источники внешней нестационарной нагрузки.

Для упрощенной оценки опасности неустойчивой работы используются следующие условия. Так, согласно данным В. А. Дмитриева [11, с. 636] «нормально относительный эксцентриситет должен быть не более 0,55...0,6, так как при меньших значениях работа подшипника может оказаться неустойчивой и возникает опасность появления автоколебаний. Если это условие не выполнено, следует увеличить относительный зазор или выбрать масло с меньшей вязкостью».

П. И. Орлов [14], исходя из предельно допустимой величины относительного эксцентриситета 0,7 в диапазоне относительной ширины подшипника 0,5–2,0, предложил формулу для минимального относительного зазора подшипника:

$$\varphi_{\min} = 3,5\sqrt{\lambda} \sqrt{\frac{B}{D'}}, \quad (1),$$

где λ — характеристика режима подшипника.

Данная характеристика определяется по формуле

$$\lambda = \frac{\eta \omega_h}{2\pi r' 10^6}.$$

Результаты расчета по формуле (1) приведены в табл. 5, откуда видно, что средний относительный зазор для большинства подшипников, ниже рекомендованного как по ГОСТу ИСО 7902, так и по формуле Орлова. Кроме того, относительный эксцентриситет для ряда подшипников ниже диапазона от 0,55–0,6, т. е. находится в зоне появления вероятности неустойчивой работы.

Таблица 5

Параметры, характеризующие устойчивость подшипника

Подшипник, расположение	R_e	$R_{e\max}$	$\bar{\psi}$, ‰	$\bar{\psi}_r$, ‰	$\psi_{\min}$, ‰	ϵ
Шестерня входная от ГТД	445	1077	1,6	2,1	2,4	0,52
Колесо первой ступени	235	1267	1,2	1,8	1,6	0,54
Шестерня второй ступени	226	1259	1,2	1,7	1,1	0,71
Шестерня второй ступени	196	1250	1,2	1,7	1,2	0,66
Колесо выходное	52	1467	0,9	1,3	0,6	0,77
Шестерня входная от ГЭД	89	1065	1,6	1,5	1,4	0,73
Шестерня привода МРП	197	1304	1,1	1,8	1,0	0,71
Шестерня МРП левая	213	1266	1,2	1,8	1,7	0,51
Колесо МРП левое	210	1266	1,2	1,8	1,3	0,64
Колесо МРП правое	196	1265	1,2	1,7	1,2	0,65
Шестерня МРП правая	213	1266	1,2	1,8	1,7	0,51

Результаты выполненного расчета значительно отличаются по величине относительного эксцентриситета, расхода смазочного материала и температуры на выходе. Основная причина этого состоит в том, что в расчете [13] средний относительный зазор в подшипниках получен из рекомендованной табл. 4 по ГОСТу ИСО 7902. В настоящем расчете зазор вычислен по реальным размерам согласно конструкторской документации. При этом реальные зазоры в подшипниках установлены ниже на 28–55% рекомендуемых (кроме подшипника входной шестерни от гребного электродвигателя).

Выводы (Conclusions)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Расчет показал, что параметры подшипников рассматриваемого опытного редукторного комплекса удовлетворяют требованиям ГОСТа ИСО 7902 (для критической толщины смазочного слоя $h_{\lim}$ максимально допустимой удельной нагрузки на подшипник $\dot{p}_{\lim}$ и предельно допустимой допустимой температуры подшипника $T_{\lim}$).

2. Необходимое условие по величине критерия Рейнольдса для применимости методики расчета по ГОСТу ИСО 7902 выполняется. Однако неучтенные в ГОСТе ИСО 7902 признаки, такие как величины относительного эксцентриситета [11] и относительного зазора в подшипниках [14], показывают потенциальную возможность возникновения неустойчивого режима работы подшипников, который может быть причиной повышенной вибрации, износа и выхода их из строя. Устойчивость работы подшипников не может в полной мере подтверждаться данным расчетом, поскольку применимость методики по ГОСТу ИСО 7902 ограничена статическими условиями работы подшипников и не распространяется на условия динамического нагружения, когда значение и направление нагрузки изменяются в зависимости от времени, которые могут быть результатом влияния вибрации и неустойчивости быстро вращающихся валов. [15].

3. Подшипники второй ступени редуктора имеют карманы для подвода смазки, которые расположены несимметрично относительно вектора нагрузки. В ГОСТе ИСО 7902 отсутствуют

зависимости для расчета таких подшипников. Косвенный учет несимметричности путем уменьшения расчетного угла охвата показал, что при этом уменьшается расход масла и повышается температура масла на выходе (для шестерни второй ступени на 10 °С), поэтому рекомендуется расположить карманы симметрично вектору нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левчук К. С. Инновационное развитие российского судостроения: состояние и перспективы / К. С. Левчук, Л. С. Абрамова // *Инновации. Наука. Образование*. — 2021. — № 36. — С. 1868–1875.
2. Столяров С. П. Современные актуальные проблемы, как средство прогнозирования перспективы судового дизелестроения / С. П. Столяров, А. С. Столяров // *Актуальные проблемы морской энергетики. Материалы девятой Международной научно-технической конференции*. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2020. — С. 63–74.
3. Кузнецов Р. В. Аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта разработки и проектирования судовых реверс-редукторных передач / Р. В. Кузнецов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.
4. Кузнецов Р. В. Обобщение и оценка вариантов перспективных газотурбинных агрегатов и их редукторных передач для нужд отечественного судостроения / Р. В. Кузнецов // *Судостроение*. — 2022. — № 3 (862). — С. 49–52.
5. Леванов И. Г. Методика расчета ресурса подшипников скольжения на ранних этапах проектирования поршневых и роторных машин / И. Г. Леванов, Е. А. Задорожная, Д. Н. Никитин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. — 2021. — Т. 21. — № 3. — С. 5–21. DOI: 10.14529/engin210301.
6. Заказ 20386. Редукторный комплекс 6РП. Расчет зубчатых зацеплений на прочность по ГОСТ 21354–81 № 1.6 РП.2529–14РР. — СПб.: ОАО «Звезда», 2014.
7. Антипенко Г. Л. Дефекты и методы диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий: монография / Г. Л. Антипенко. — Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. — 243 с.
8. Михайлов-Михеев П. Б. Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения / П. Б. Михайлов-Михеев. — М.: МАШГИЗ, 1961. — 838 с.
9. Крюков В. А. Моделирование цилиндрической зубчатой передачи на параллельных осях с регулируемым боковым зазором / В. А. Крюков, Т. В. Нам, А. В. Плясов // *Проблемы машиноведения. Материалы V Международной научно-технической конференции*. — Омск: Омский государственный технический университет, 2021. — С. 454–463. DOI: 10.25206/978-5-8149-3246-4-2021-454-463.
10. Коровчинский М. В. Теоретические основы работы подшипников скольжения / М. В. Коровчинский. — М.: Машгиз, 1959. — 408 с.
11. Дмитриев В. А. Детали машин / В. А. Дмитриев. — Л.: Судостроение, 1970. — 793 с.
12. РТМ 24.060.21–83. Охладители водомасляные. Методы расчета. — Л.: ЦНИДИ, 1983. — 103 с.
13. Заказ 20386. Редукторный комплекс 6РП. Гидродинамический расчет подшипников скольжения по ГОСТ ИСО 7902–3–2001, ГОСТ ИСО 7902–2–2001, ГОСТ ИСО 7902–3–2001, № 1.6РП.2530–2014РР. — СПб.: ОАО «Звезда», 2014.
14. Орлов П. И. Основы конструирования: справ.-метод. пособие / П. И. Орлов. — М.: Машиностроение, 1988. — Кн. 2. — 544 с.
15. ГОСТ ИСО 7902–1–2001. Гидродинамические радиальные подшипники скольжения, работающие в стационарном режиме. Круглоцилиндрические подшипники. Ч. 1: Метод расчета. — ИПК «Изд-во стандартов», 2002. — 28 с.

REFERENCES

1. Levchuk, K. S., and L. S. Abramova. "Innovatsionnoe razvitie rossiiskogo sudostroeniya: sostoyanie i perspektivy." *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* 36 (2021): 1868–1875.
2. Stolyarov, S.P., and A. S. Stolyarov. "Actual problems as a means for forecasting future marine diesel engineering." *Aktual'nye problemy morskoi energetiki. Materialy devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2020. 63–74.

3. Kuznetsov, Ruslan V. "Analytical review of domestic and foreign experience in the development and design of ship reverse gears." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.
4. Kuznetsov, R. V. "Generalization and estimation of prospective gas-turbine units and their reduction gear for the needs of domestic shipbuilding." *Shipbuilding* 3(862) (2022): 49–52.
5. Levanov, I. G., E. A. Zadorozhnaya, and D. N. Nikitin. "Methods for calculating the resource of journal bearings at early stages of designing piston and rotary machines." *Bulletin of the South Ural state university. Series: Mechanical engineering* 21.3 (2021): 5–21. DOI: 10.14529/engin210301.
6. *Raschet zubchatykh zatseplenii na prochnost' po GOST 21354–81*. SPb.: OAO «Zvezda», 2014.
7. Antipenko, G. L. *Defekty i metody diagnostirovaniya mekhanicheskikh i gidromekhanicheskikh transmissii*. Mogilev: Belorus.-Ros. un-t, 2020.
8. Mikhailov-Mikheev, P. B. *Spravochnik po metallicheskim materialam turbino- i motoro-stroeniya*. M.: MashgiZ, 1961.
9. Krukov, V. A., T. V. Nam, and A. V. Plyasov. "Simulation of a cylindrical-conical gear train on parallel axes with an adjustable side clearance." *V International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update"*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2021. 454–463. DOI: 10.25206/978-5-8149-3246-4-2021-454-463.
10. Korovchinskii, M. V. *Teoreticheskie osnovy raboty podshipnikov skol'zheniya*. M.: Mashgiz, 1959.
11. Dmitriev, V. A. *Detali mashin*. L.: Sudostroenie, 1970.
12. *RTM 24.060.21–83. Okhladiteli vodomashinye. Metody rascheta*. Leningrad: TsNIDI, 1983.
13. *Gidrodinamicheskii raschet podshipnikov skol'zheniya po GOST ISO 7902–3–2001, GOST ISO 7902–2–2001, GOST ISO 7902–3–2001*. SPb.: OAO «Zvezda», 2014.
14. Orlov, P. I. *Osnovy konstruirovaniya: Spravochno-metodicheskoe posobie*. Vol. 2. M.: Mashinostroenie, 1988.
15. State Standard ISO 7902–1–2001. Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions. Circular cylindrical bearings. Part 1. Calculation procedure. IPK Izdatel'stvo standartov, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Руслан Валерьевич —
кандидат технических наук, главный металлург
ПАО «Звезда»
192012, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Бабушкина, 123
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29
e-mail: kuznetsovrv@zvezda.spb.ru

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

Вихров Николай Михайлович —
генеральный директор
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»
198184, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Канонерский остров, 41
e-mail: dock@ksz.spb.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Ruslan V. —
PhD, Chief Metallurgist
PJSC, Zvezda
123 Babushkina Str.,
St. Petersburg, 192012,
Russian Federation
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251,
Russian Federation
e-mail: kuznetsovrv@zvezda.spb.ru

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

Vikhrov, Nikolay M. —
CEO
JSC «KSZ»
41, Kanonersky Island, St. Petersburg, 198184,
Russian Federation
e-mail: dock@ksz.spb.ru

Статья поступила в редакцию 26 июля 2023 г.
Received: July 26, 2023.

APPLICATION OF STRUCTURAL METHODS TO ASSESS THE RELIABILITY OF SHIP'S MECHANICAL SYSTEMS

E. S. Moseyko¹, E. O. Ol'khovik², V. G. Nikiforov²

¹ — “Iceberg” Central Design Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

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

At present, reliability indicators are of great importance at the design stages, during operation and in cases of extending the technical life. This is one of the reasons for choosing the research topic on the application of structural methods for evaluating the reliability of ship mechanical systems. The operational stage of the life cycle of ship's mechanical systems is considered in the paper. Durability criteria such as service life, operating time, frequency of repairs are chosen as reliability indicators. In turn, work on the repair, maintenance or replacement of ship's mechanical systems elements is carried out in accordance with the assigned regulations or in the case of an unforeseen failure. The comparison of event models of changes in the operating conditions of ship's mechanical systems is carried out. To estimate the remaining resource in the form of graphs, events are shown by service life and operating hours, distributed by years. In order to improve the existing methods for assessing reliability, a set of elements of the average values of the residual resource and residual output is considered. The approach proposed by the authors for assessing both element by element and the entire ship mechanical system as a whole allows us to consider the residual resource from the moment of monitoring its technical condition to the transition to the limit state, to plan technical measures and prevent possible malfunctions. Three different time slices models corresponding to planned repairs and maintenance of systems, replacement of system elements and unforeseen accidents are considered in the study. The difference in the amplitudes of the calculated indicators of the ship's mechanical systems reliability has shown that the closer the options between the maximum and minimum values are to the average, the more accurately the statistical indicators characterize this pattern. However, amplitude deviations can be used to apply fault risk assessment. This line of research seems to be important for ships in the Arctic navigation area, which are characterized by increased requirements for ship survivability.

Keywords: ship's mechanical systems, reliability, accidents on ships, residual life, service life.

For citation:

Moseyko, Evgeniy S., Evgeniy O. Ol'khovik, and Vladimir G. Nikiforov. “Application of structural methods to assess the reliability of ship's mechanical systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844.

УДК 621.78/79:629

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е. С. Мосейко¹, Е. О. Ольховик², В. Г. Никифоров²

¹ — АО «Центральное конструкторское бюро «Айсберг», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Темой настоящей работы является исследование показателей надежности судовых механических систем, имеющих важное значение как на стадиях проектирования, так и в период эксплуатации, а также в случаях продления технического ресурса. В работе рассмотрен эксплуатационный этап жизненного цикла судовых механических систем. В качестве показателей надежности выбраны критерии долговечности: срок службы, наработка, периодичность проведения ремонта. В свою очередь работы по ремонту, обслуживанию или замене элементов судовых механических систем производятся в соответствии с назначенными регламентами или в случае непредвиденного выхода их из строя. Выполнено сравнение событийных моделей изменения

условий эксплуатации судовых механических систем. Для оценки остаточного ресурса в виде графиков изображены события (по сроку службы) и по наработке (часов), распределенные по годам. В целях улучшения существующих методов оценки надежности рассматривается совокупность элементов средних значений остаточного ресурса и остаточной выработки. Предлагаемый подход оценки как поэлементно, так и в целом судовой механической системы позволяет рассматривать остаточный ресурс от момента проведения контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние, планировать технические мероприятия и предупреждать возможные неисправности. В исследовании рассмотрены три различные модели временных срезов, соответствующие плановым ремонтам и техническому обслуживанию систем, замене элементов систем и непредвиденным аварийным случаям. Разность амплитуд расчетных показателей надежности судовых механических систем показывает, что чем ближе варианты между максимальными и минимальными значениями к среднему, тем точнее статистические показатели характеризуют эту закономерность. Тем не менее отклонения значений амплитуд возможно использовать для применения оценки рисков неисправностей. Данное направление исследований представляется важным для судов арктического района плавания, для которых характерными являются повышенные требования живучести судов.

Ключевые слова: судовые механические системы, надежность, аварийные случаи на судах, остаточный ресурс, срок эксплуатации, методы расчета, оценка рисков.

Для цитирования:

Мосейко Е. С. Применение структурных методов для оценки надежности судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844.

Введение (Introduction)

Определение надежности судовых механических систем (далее — СМС) является сложной технической задачей, распространяющейся как на постройку новых судов, так и на продление ресурса работы судов, имеющих значительный срок эксплуатации. Наиболее актуальной данная задача является для судов, эксплуатирующихся в полярных водах Арктики, т. е. в наиболее сложных климатических условиях, когда требования к надежности судовых механических систем повышаются.

Целью данной работы является сравнительный анализ работоспособности отдельных элементов СМС в период их эксплуатации. В качестве объектов исследования выбраны элементы, входящие в СМС: подшипник, насос, электродвигатель, трубопроводная арматура.

Структурные методы являются основными видами расчета показателей надежности несложных систем в процессе технического проектирования. В общем случае методы представлены в виде структурной схемы, показывающей взаимодействия между элементами и оцениваются математической моделью в рассматриваемых условиях применения. Для СМС приведена последовательная структура, при которой отказ отдельного элемента может приводить к отказу системы в целом. Методология структурных методов расчета надежности [1], как правило, включает логическое укрупнение или разукрупнение элементов системы с определенной структурной последовательностью.

Построение структурной схемы позволяет вычислить показатели надежности по данным о наработке и сроку службы его элементов в рассматриваемых условиях. В работе [2] рассмотрена совокупность методов оценки рисков. Использована концепция приоритета матрицы риска, полученный на основе анализа вероятности и последствий отказов. Исследованы возможные связи проектного расчета надежности СМС и оценки рисков на основе фактических данных об аварийных случаях. В работе [3] рассматривается эксплуатационный этап жизненного цикла судовых механических систем. Проанализированы аварийные случаи на судах, произошедшие на море и внутренних водных путях, представлен порядок продления срока службы при классификационном освидетельствовании в эксплуатации. Следует также отметить результаты исследований выполненных, например, в работе [4], в которой приведен сравнительный анализ основных структурных схем резервирования, дублирования и троирования устройств автоматического контроля. Рассмотрены шкалы предпочтений систем по критериям максимумов среднего времени и средней вероятности безотказной работы. В работе [5] рассмотрен метод моделирования вероятности возникновения АС на примере элементов судовых энергетических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предполагается, что «построечные отказы» имеют мгновенный максимум в самом начале эксплуатации. С учетом требований РС¹ стратегия управления безопасностью судна должна строиться исходя из принципов о недопустимости ущерба его оборудованию или сведения его к минимуму, предотвращения любого риска, связанного с экологическими последствиями и жизнью человека. Кроме того, с учетом требований² можно оценить «фактическое техническое состояние» в соответствии с установленной системой рейтинга и присвоением баллов.

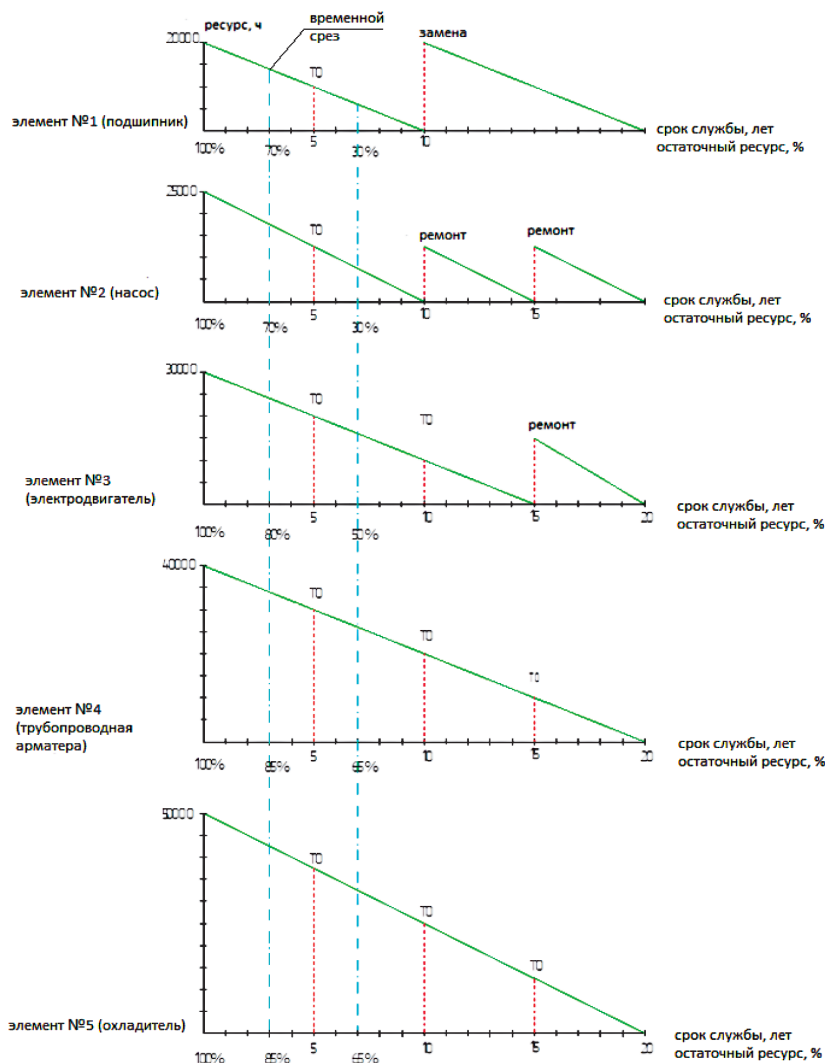


Рис. 1. Структурная поэлементная схема оценки остаточного ресурса СМС

В работе [6] исследуется вопрос определения скорости изнашивания элементов судовых технических средств на неустановившихся (в процессе приработки) и стационарных (во время стендовых испытаний) режимах. При рассмотрении причин аварийных случаев выполняется исследование работоспособности отдельных элементов СМС, значения отказа каждого отдельного элемента которой определяются на основе статистических данных. При этом существует несколько различных схем соединения и взаимодействия элементов внутри СМС, последовательное соединение элементов которой может приводить к отказу всей системы в целом, так как выход из строя даже одного ее элемента приводит к разрыву последовательной цепочки всей структуры. Применение

¹ НД № 2-080101-013. Руководство по осуществлению положений Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. 92 с.

² НД № 2-039901-006. Рекомендации по комплексной оценке фактического технического состояния судна (САР). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2023. 17 с.

дублирования элементов в СМС при параллельном соединении приводит к увеличению материалоемкости и общей стоимости СМС.

На практике необходимо проведение ремонтных работ в сроки, соответствующие текущему (5 лет), заводскому (10 лет) или капитальному (20 лет) ремонту для соблюдения требований надежности, что приводит к увеличению ресурса отдельных (отремонтированных) элементов и СМС в целом, однако несмотря на это указанную периодичность необходимо учитывать.

На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема СМС, выполненная графоаналитическим методом, которая показывает поэлементное уточнение показателей надежности СМС в целом и отдельных ее элементов. На основании исходной информации о параметрах надежности (например, ТУ, паспорта) рассматриваются ресурс и срок службы. Эти данные наносятся на координатные оси, строятся линейные графики остаточного ресурса для каждого элемента СМС. Оценка показывает, что как ресурс, так и срок службы для различных элементов разный. Далее производятся временные срезы (например, через пять лет или по мере необходимости (ТО, ремонт)), что позволяет выявить параметры надежности в процессе эксплуатации, и также используется для моделирования остаточного ресурса СМС. По временным срезам определяются минимальные, максимальные и средние значения (для каждого элемента и СМС в целом) остаточного ресурса и срока службы. Поскольку ТУ и паспорт на элементы СМС предполагают их загруженность со средним коэффициентом использования, равным 0,3, данное обстоятельство также учитывалось в работе. Модель предусматривает учет мероприятий по ТО, ремонту или замене элементов СМС для уточнения срока службы и остаточного ресурса.

Результаты (Results)

В таблице рассмотрены событийные модели изменения остаточного ресурса всей СМС, при этом принимаются следующие модели:

- модель 1 — замена элементов по критерию выработки, проведение технических мероприятий по плану-графику ТО;
- модель 2 — замена подшипника и насоса, вышедшие из строя раньше времени;
- модель 3 — замена электродвигателя и арматуры, вышедшие из строя раньше времени.

Виды моделей остаточного ресурса элементов СМС

Вид	Срок службы	Среднее значение остаточного ресурса, %	Среднее значение остаточной выработки, ч	Технические мероприятия
Модель 1	5	62	23750	—
	10	27	13000	Замена подшипника по выработке, ремонт насоса по плану-графику
	15	26	6750	Ремонт насоса по плану-графику, ремонт электродвигателя по плану-графику
	20	3	1100	—
Модель 2	5	60	23750	Замена подшипника по неисправности
	10	27	13000	Замена насоса по неисправности
	15	26	6750	Замена подшипника по выработке, ремонт электродвигателя по плану-графику
	20	26	5400	—
Модель 3	5	62	23750	—
	10	27	13000	Замена подшипника по выработке, замена арматуры по неисправности
	15	39	15500	Ремонт насоса по плану-графику, замена электродвигателя по неисправности
	20	34	10750	—

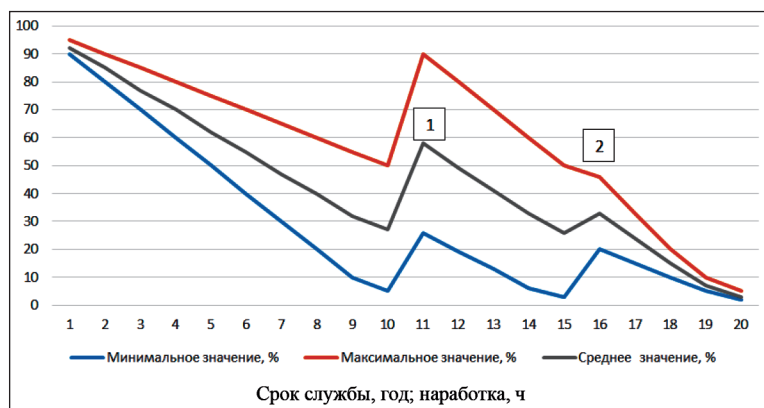
В таблице приведены данные начиная с пятого года эксплуатации СМС, поскольку предыдущий период не предполагает проведение ТО, планового ремонта и т.п. Далее рассмотрен остаточный ресурс по основным элементам СМС.

Модель № 1 (рис. 2).

По окончании срока службы СМС 5 лет средние значения остаточного ресурса 62 % и выработки 23750 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 12500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 66 %, остаток выработки 20000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 30000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 37500 ч.

а)



б)

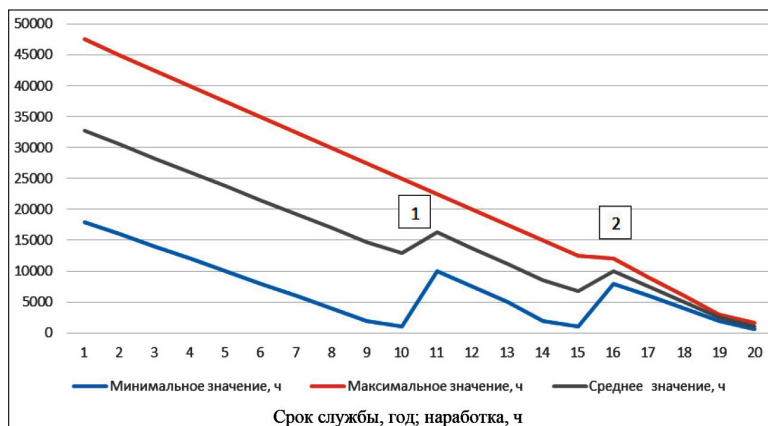


Рис. 2. Оценка остаточного ресурса в целом СМС модели № 1:

а — по годам (сроку службы): 1 — замена подшипника, ремонт насоса;

2 — ремонт насоса, ремонт электродвигателя; б — по наработке (ч):

1 — замена подшипника, ремонт насоса; 2 — ремонт насоса, ремонт электродвигателя

По окончании срока службы СМС 10 лет средние значения остаточного ресурса 27 % и выработки 13000 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1000 ч;
- насос — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 33 %, остаток выработки 10000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 20000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 25000 ч.

По окончании срока службы СМС 15 лет средние значения остаточного ресурса 26 % и выработки 6750 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 3 %, остаток выработки 1000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 25 %, остаток выработки 10000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 25 %, остаток выработки 12500 ч.

По окончании срока службы СМС 20 лет средние значения остаточного ресурса 3 % и выработки 1100 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 4 %, остаток выработки 1000 ч;
- насос — остаток ресурса 4 %, остаток выработки 1200 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 3 %, остаток выработки 1500 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 2 %, остаток выработки 800 ч;
- охладитель — остаток ресурса 2 %, остаток выработки 1200 ч.

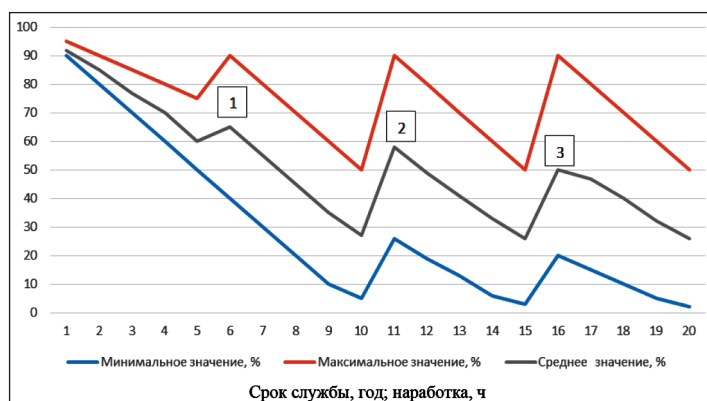
На рис. 2–4 приведены графики по выбранным моделям.

Модель № 2 (рис. 3).

По окончании срока службы СМС 5 лет средние значения остаточного ресурса 62 % и выработки 23750 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 12500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 66 %, остаток выработки 20000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 30000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 37500 ч.

а)



б)

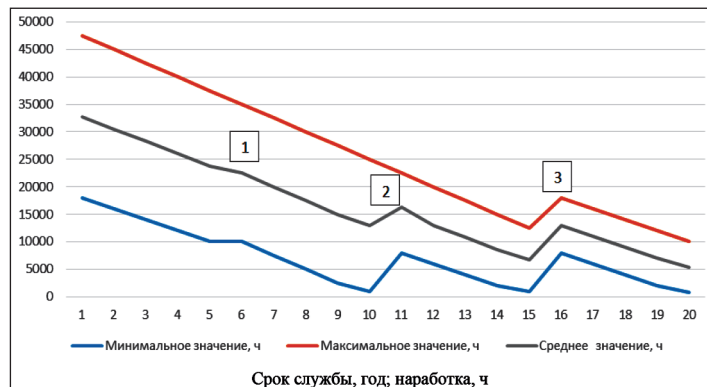


Рис. 3. Оценка остаточного ресурса в целом СМС модели № 2:

а — по годам (сроку службы): 1 — замена подшипника; 2 — замена насоса;

3 — замена подшипника, ремонт электродвигателя;

б — по наработке, ч: 1 — замена подшипника; 2 — замена насоса;

3 — замена подшипника, ремонт электродвигателя

По окончании срока службы СМС 10 лет средние значения остаточного ресурса 27 % и выработки 13000 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 33 %, остаток выработки 10000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 20000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 25000 ч.

По окончании срока службы СМС 15 лет средние значения остаточного ресурса 39 % и выработки 15500 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1000 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 3 %, остаток выработки 1000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 30000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 25 %, остаток выработки 12500 ч.

По окончании срока службы СМС 20 лет средние значения остаточного ресурса 34 % и выработки 10750 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 4 %, остаток выработки 1000 ч;
- насос — остаток ресурса 4 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 66 %, остаток выработки 20000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 20000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 2 %, остаток выработки 1200 ч.

Модель № 3 (рис. 4).

По окончании срока службы СМС 5 лет средние значения остаточного ресурса 62 % и выработки 23750 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 12500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 66 %, остаток выработки 20000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 30000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 37500 ч.

По окончании срока службы СМС 10 лет средние значения остаточного ресурса 27 % и выработки 13000 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1000 ч;
- насос — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 33 %, остаток выработки 10000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 20000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 25000 ч.

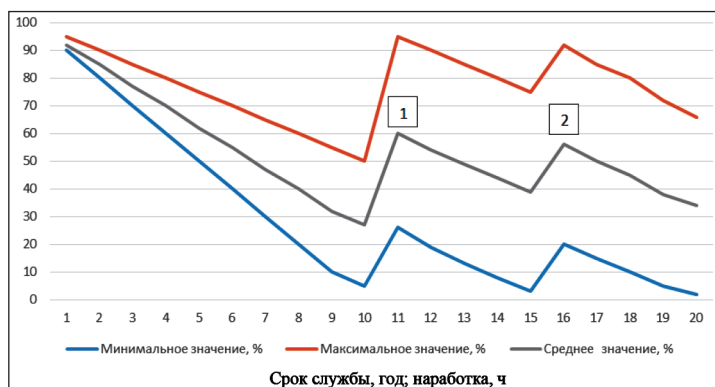
По окончании срока службы СМС 15 лет средние значения остаточного ресурса 39 % и выработки 15500 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 10000 ч;
- насос — остаток ресурса 5 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 3 %, остаток выработки 1000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 75 %, остаток выработки 30000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 25 %, остаток выработки 12500 ч.

По окончании срока службы СМС 20 лет средние значения остаточного ресурса 34 % и выработки 10750 ч. Оценка по элементам СМС следующая:

- подшипник — остаток ресурса 4 %, остаток выработки 1000 ч;
- насос — остаток ресурса 4 %, остаток выработки 1500 ч;
- электродвигатель — остаток ресурса 66 %, остаток выработки 20000 ч;
- трубная арматура — остаток ресурса 50 %, остаток выработки 20000 ч;
- охладитель — остаток ресурса 2 %, остаток выработки 1200 ч.

а)



б)

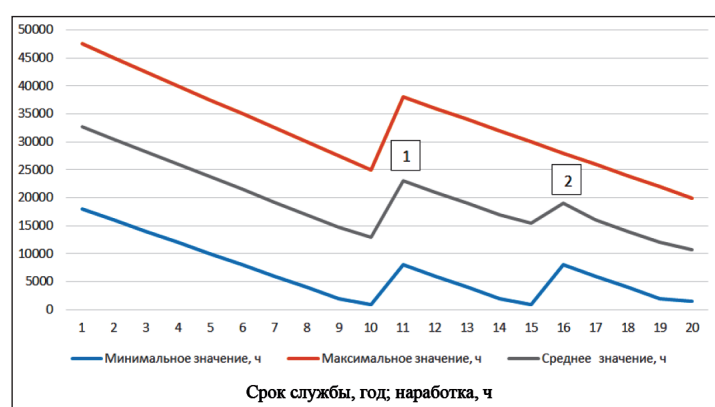


Рис. 4. Оценка остаточного ресурса в целом СМС модели № 3:

- а — по годам (сроку службы): 1 — замена подшипника и арматуры, ремонт насоса;
2 — ремонт насоса, замена электродвигателя; б — по наработке, ч:
1 — замена подшипника и арматуры, ремонт насоса;
2 — ремонт насоса, замена электродвигателя.

Исследованные в данной работе модели направлены на оценку надежности СМС при их эксплуатации и возможном продлении ресурса. Рассмотренный структурный метод включает следующие этапы:

- оперативную оценку технического состояния и диагностику СМС;
- документарную или электронную фиксацию данных о снижении работоспособности, повреждениях, разрушениях и авариях (судовой и машинный журналы, журнал учета технического состояния, планы-графики ТО, формуляры и т.п.);
- выбор функций для статистического анализа, которые показывают как развиваются повреждения, связанные с произошедшими инцидентами в СМС;
- статистическое моделирование для распознавания признаков возможных повреждений или снижения эксплуатационных характеристик СМС.

Обсуждение (Discussion)

В процессе сравнения полученных результатов с работами других авторов можно отметить следующее: в работе [7] приводится подтверждение того, что технические причины более 1/3 аварийных случаев за последние два десятилетия были вызваны повреждением или поломкой главного двигателя, рулевого устройства и другого основного оборудования. При этом в работе [8] отмечается, что СТС, включая все системы, ежегодно составляют 33–40% от общего количества АС.

В работе [9] на примере радиоэлектронных систем определяются требования надежности структурных элементов с учетом интенсивности отказов, а также возможных изменений параметров элементов проектируемой системы в процессе эксплуатации. В работе [10] на примере электротехнической системы рассматривались данные пяти состояний отказов компонентов с использованием логико-вероятностного метода.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Анализ результатов, полученных при использовании модели № 1, показал, что по окончании срока службы 5 лет проводилось ТО всех элементов по плану-графику; после 10 лет была выполнена замена подшипника по выработке, произведен ремонт насоса по плану-графику; после 15 лет — ремонт насоса и электродвигателя по плану-графику. К окончанию срока службы 20 лет среднее значение остаточного ресурса СМС составляет 3 %, среднее значение остаточной выработки СМС — 1100 ч.

2. Анализ результатов при использовании модели № 2 показал, что после срока службы 5 лет необходима замена подшипника по неисправности и ТО остальных элементов; после 10 лет — замена насоса по неисправности; после 15 лет — замена подшипника по выработке, ремонт электродвигателя по плану-графику. К окончанию срока службы 20 лет среднее значение остаточного ресурса СМС составляет 26 %, среднее значение остаточной выработки СМС — 5400 ч.

3. Анализ результатов при использовании модели № 3 показал, что по окончании срока службы 5 лет проводилось ТО всех элементов; после 10 лет была выполнена замена подшипника по выработке, замена арматуры по неисправности; после 15 лет произведены ремонт насоса по плану-графику и замена электродвигателя по неисправности. К окончанию срока службы 20 лет среднее значение остаточного ресурса СМС составляет 34 %, среднее значение остаточной выработки СМС — 10750 ч.

4. В целом результат анализа событийных моделей показывает, что с применением данного подхода оценки как поэлементно, так и в целом всей СМС, появилась возможность рассматривать остаточный ресурс от момента проведения контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние, а также планировать технические мероприятия и предупреждать возможные неисправности.

5. Полученный разброс величин амплитуды между минимальными и максимальными значениями следующий: по модели 1 остаточный ресурс СМС составляет 2–4 %, остаточная выработка СМС — 800–1500 ч; по модели 2 остаточный ресурс СМС составляет 2–50 %, остаточная выработка СМС — 800–10000 ч; по модели 3 остаточный ресурс СМС составляет 2–66 %, остаточная выработка СМС — 1500–10750 ч.

6. Разность амплитуды внутри одной модели показывает, что чем ближе варианты между максимальными и минимальными значениями к среднему, тем более точно статистические показатели характеризуют измерения, указанные в пп. 5. При этом отклонения значений амплитуд можно использовать для применения оценки рисков неисправностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторова В. С.* Модели и методы расчета надежности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степанянц. — Изд. 2, испр. — М.: ЛЕНАНД, 2016. — 256 с.
2. *Мосейко Е. С.* Задачи оценки рисков и предупреждения отказов судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944.
3. *Мосейко Е. С.* Оценка надежности судовых механических систем для арктического судоходства / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 120–128. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-120-128.

4. Анищенко В. А. Анализ надежности резервированных систем автоматического контроля и управления производственными энергетическими процессами / В. А. Анищенко, Е. Л. Мысло, А. Н. Иванова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2014. — № 6. — С. 5–14.

5. Давыдов Д. А. Анализ риска эксплуатации элементов судовых энергетических установок на основе имитационного моделирования / Д. А. Давыдов, А. А. Стяжкин, В. А. Туркин // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2020. — № 4 (33). — С. 17–23.

6. Клименко Н. П. Оценка надежности трибосистем на неустановившихся режимах работы / Н. П. Клименко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 2. — С. 7–12. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-7-12.

7. Мотрич В. Н. Причины аварий на морском флоте / В. Н. Мотрич, Д. А. Акмайкин // Вестник Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского (может в названии журнала не включено). — 2021. — № 88. — С. 4–8.

8. Соболенко А. Н. Анализ технических отказов на промысловых судах в Дальневосточном регионе / А. Н. Соболенко, И. П. Турищев, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 48–55. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-48-55.

9. Гришко А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. — 2016. — № 2 (16). — С. 51–57.

10. Жердецкий Ю. В. Методика расчета надежности многокомпонентных структурно-сложных систем со многими состояниями: сборник научных работ студентов, магистрантов и аспирантов / Ю. В. Жердецкий, Г. А. Мальцева. — Изд-во «Гомельский государственный ун-т им. Ф. Скорины, 2013. — Ч. 1. — С. 106–109.

REFERENCES

1. Viktorova, V. S., and A. S. Stepanyants. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem*. 2nd edition. M.: LENAND, 2016.

2. Moseyko, Evgeniy S., and Evgeniy O. Ol'khovik. "Tasks of risks assessment and failures prevention of the ship's mechanical systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944.

3. Moseyko, Evgeniy S., and Evgeniy O. Ol'khovik. "Assessment of ship mechanical systems reliability for arctic shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 120–128. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-120-128.

4. Anishchenko, V. A., E. L. Myslo, and A. N. Ivanova. "Analysis of reliability of reserved automatic control systems of industrial power processes." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 6 (2014): 5–14.

5. Davudov, D. A., A. A. Styazhkin, and V. A. Türkin. "Risk analysis of operation of elements of shipping power plants based on simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 4(33) (2020): 17–23.

6. Klimenko, N. P. "Evaluating reliability of tribosystems based on unsteady operating modes." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2022): 7–12. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-7-12.

7. Motrich, V., and D. Akmaykin. "Causes of accidents in the merchant fleet." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 88 (2021): 4–8.

8. Sobolenko, A. N., I. P. Turishchev, M. V. Gomzyakov, and O. V. Moskalenko. "Analysis of technical failures on fishing vessels in the Far East." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 3 (2019): 48–55. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-48-55.

9. Grishko, A. K. "Calculation indicators of reliability structural elements of complex systems with fault logging and parameter changes." *Measuring. Monitoring. Management. Control* 2(16) (2016): 51–57.

10. Zherdetskii, Yu. V., and G. A. Mal'tseva. "Metodika rascheta nadezhnosti mnogokomponentnykh strukturno-slozhnykh sistem so mnogimi sostoyaniyami." *Sbornik nauchnykh rabot studentov, magistrantov i aspirantov*. Vol. 1. Izd-vo «Gomel'skii gosudarstvennyi un-t im. F. Skoriny, 2013. 106–109.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мосейко Евгений Сергеевич —

инженер-технолог отдела технологии,
экономики производства, нормирования
материалов

АО «Центральное конструкторское бюро
«Айсберг»

199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Большой пр., 36

e-mail: evgeniy-moseyko@mail.ru

Ольховик Евгений Олегович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Никифоров Владимир Григорьевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_mnt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moseyko, Evgeniy S. —

Process Engineer of the Department
of Technology, Industrial Economy
and Materials Rationing

“Iceberg” Central Design Bureau

36 Bol'shoi Ave.,

St. Petersburg, 199034,

Russian Federation

e-mail: evgeniy-moseyko@mail.ru

Ol'khovik, Evgeniy O. —

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: olhovikeo@gumrf.ru

Nikiforov, Vladimir G. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: kaf_mnt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 августа 2023 г.

Received: August 19, 2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857

EFFICIENCY OF LIMITING NITROGEN OXIDES EMISSIONS BY EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEMS OF MARINE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

The subject of this study is systems for ensuring environmental safety of marine internal combustion engines, in particular, technologies for limiting emissions of nitrogen oxides (NO_x). The regulatory requirements for reducing emissions are presented in the paper. The main theoretical aspects of the problem of nitrogen oxides formation during combustion in a diesel engine are considered. On the basis of these theoretical aspects the effectiveness of using various methods to achieve the requirements for the permissible level of NO_x concentration in the exhaust gases is assessed. Exhaust gas recirculation (EGR) systems and selective catalytic reduction (SCR) systems are considered as the main technologies; they allow achieving the highest indicators of nitrogen oxide emissions control in accordance with the requirements of the Tier 3 standard. Taking into account the peculiarities of the requirements for the design and layout of systems as part of a ship power plant, as well as operational and investment costs, the main attention in the work is paid to systems of indirect influence on the engine in-cylinder processes, which include exhaust gas recirculation systems. Based on the comparison of high and low pressure EGR, the advantages and disadvantages of the designs are determined. It is noted that high-pressure exhaust gas recirculation systems have a number of advantages, which primarily include the compactness and high speed of the system response to changes in operational conditions. On the example of the leading manufacturers developments, the potential capabilities of the high-pressure EGR system and the engine characteristics confirming the effectiveness of its use are demonstrated. Based on the results of the work, a conclusion about the high efficiency and expediency of using exhaust gas recirculation systems to meet the requirements of the current environmental safety standards of ship power plants is made.

Keywords: marine internal combustion engine, environmental safety, emission of nitrogen oxides, exhaust gas recirculation system, achievement of regulatory requirements.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Efficiency of limiting nitrogen oxides emissions by exhaust gas recirculation systems of marine internal combustion engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.

УДК 621.43.074

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА СИСТЕМАМИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДВС

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Предметом настоящего исследования являются системы обеспечения экологической безопасности судовых двигателей внутреннего сгорания, в частности, технологии ограничения выбросов оксидов азота (NO_x). В работе приведены нормативные требования по сокращению выбросов и рассмотрены основные

теоретические аспекты проблемы образования оксидов азота в процессе сгорания в дизельном двигателе, на основании которых произведена оценка эффективности применения различных способов достижения требований к допустимому уровню концентрации NO_x в составе отработавших газов. В качестве основных технологий рассмотрены системы рециркуляции отработавших газов (EGR) и системы селективного каталитического восстановления (SCR) как технологии, позволяющие добиться достижения наивысших показателей ограничения выбросов оксидов азота в соответствии с требованиями стандарта Tier третьего уровня. Учитывая особенности требований к конструкции и компоновке систем в составе судовой энергетической установки, а также эксплуатационные и инвестиционные затраты, основное внимание в работе уделено системам опосредованного влияния на внутрицилиндровые процессы двигателя, к которым относятся системы рециркуляции отработавших газов. На основании сопоставления EGR высокого и низкого давления определены преимущества и недостатки конструкций. Отмечается, что системы рециркуляции отработавших газов высокого давления имеют ряд преимуществ, к которым в первую очередь следует отнести компактность и высокую скорость реагирования системы на изменение эксплуатационных режимов. На примере разработок ведущих производителей продемонстрированы потенциальные возможности системы EGR высокого давления и характеристики двигателя, подтверждающие эффективность ее использования. На основе результатов работы сделано заключение о высокой эффективности и целесообразности использования систем рециркуляции отработавших газов для соблюдения требований действующих стандартов экологической безопасности судовых энергетических установок.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, эмиссия оксидов азота, системы судового двигателя, рециркуляция отработавших газов, достижение нормативных требований.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Эффективность ограничения выбросов оксидов азота системами рециркуляции отработавших газов судовых ДВС / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.

Введение (Introduction)

Сжигание углеводородных топлив в камерах сгорания поршневых ДВС приводит не только к образованию «чистых» продуктов полного окисления углеводородов, к которым относятся вода и углекислый газ, но и сопряжено с выбросом ряда вредных побочных продуктов, способных нанести урон окружающей среде. К токсичным компонентам в составе отработавших газов относятся оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x), твердые частицы (PM) и несгоревшие углеводороды. Вредные выбросы, производимые судовыми двигателями, регламентированы Правилами предотвращения загрязнения воздуха с судов, определенными Прил. VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78¹.

Достижение требований действующих норм экологической безопасности судовых энергетических установок является основной проблемой современного судостроения и в ряде случаев отодвигает на второй план вопросы топливной экономичности. Это обстоятельство главным образом относится к оксидам азота. В то время как образование оксидов серы, твердых частиц и несгоревших углеводородов определяется исключительно элементарным составом используемого топлива, выбросы оксидов азота зависят не только от наличия азота в составе топлива (даже в тяжелых остаточных топливах массовая доля азота не превышает 0,3–0,5 %), но и в значительной мере от условий протекания процессов тепловыделения в камере сгорания двигателя, исходя из того, что реагенты являются основой состава свежего заряда воздуха в цилиндре.

Составляя значительную часть вредных выбросов дизельного двигателя, эмиссия оксидов азота постоянно находится под пристальным вниманием производителей и вынуждает предпринимать конструктивные и иные меры по сдерживанию этого фактора вредного воздействия на окружающую среду. В современном двигателестроении разработаны и получают дальнейшее развитие различные методы и устройства для сокращения содержания NO_x в составе отработавших газов, среди которых наиболее эффективными оказываются технологии селективного каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR), позволяющие гарантированно достичь соответствия самым высоким уровням стандартов экологической безопасности энергетических установок.

¹ Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. Кн. I и II. 862 с.

Указанные технологии принципиально отличаются фактором влияния на внутрицилиндровые процессы поршневого ДВС, выявляя тем самым ряд преимуществ и недостатков данных систем. При этом системы рециркуляции отработавших газов обеспечивают компактность конструкции, низкие эксплуатационные затраты и не выдвигают отдельных требований к используемым топливам.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ разрабатываемых схем систем рециркуляции отработавших газов применительно к судовым ДВС с позиций оценки их эффективности в достижении требований экологических стандартов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Международная морская организация (ИМО) с 1999 г. предпринимает активные меры по поэтапному ограничению выбросов NO_x с отработавшими газами судовых двигателей, приняв за основу регламентации стандарт экологической безопасности США Tier, распространяющийся на все двигатели, исключая двигатели автотранспортного назначения. Начиная с 01 января 2011 г. для всех районов плавания действует глобальное ограничение по выбросам оксидов азота в соответствии со стандартом Tier II (табл. 1). В то же время выбросы NO_x любого дизельного двигателя, установленного на судне, построенном позднее 1 января 2016 г., должны соответствовать уровню стандарта Tier III при эксплуатации в зоне контроля выбросов (NECA), расположенной вдоль побережья Северной Америки [1]. В случаях, когда зоны NECA назначаются позднее, требования стандарта Tier III предъявляются только к судам, построенным на дату назначения или позже. Так, для зоны контроля в Северной Европе требования стандарта Tier III применяются к судам постройки позднее 1 января 2021 г.

Таблица 1

Требования стандартов Tier к выбросам оксидов азота судовыми ДВС

Уровень стандарта	Дата и зона назначения	Частота вращения коленчатого вала двигателя n , об/мин		
		$n \leq 130$	$n = 130 - 1999$	$n \geq 2000$
Tier I	01.01.2000 г. для всех регионов	17,0 г/кВт·ч	$45n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	9,8 г/кВт·ч
Tier II	01.01.2011 г. для всех регионов	14,4 г/кВт·ч	$44n^{(-0,23)}$ г/кВт·ч	7,7 г/кВт·ч
Tier III	01.01.2016 г. для NECA Северной Америки	3,4 г/кВт·ч	$9n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	2,0 г/кВт·ч
Tier III	01.01.2021 г. для NECA Северной Европы	3,4 г/кВт·ч	$9n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	2,0 г/кВт·ч

В современном двигателестроении разработано достаточно большое количество технологий сокращения эмиссии NO_x , основные и наиболее применимые из которых могут быть классифицированы в соответствии со схемой рис. 1. Согласно требованиям ИМО допускается использование любой технологии снижения выбросов NO_x в целях обеспечения соответствия двигателя действующим стандартам.

Анализ эффективности применения и эксплуатационных характеристик технологий, выполненный ранее в [2], выдвигает на первый план системы рециркуляции отработавших газов и селективного каталитического восстановления как технологии достижения полного соответствия энергетической установкой требований стандарта Tier III. При этом система SCR, являясь независимой и автономной в использовании, не оказывает воздействия на протекание внутрицилиндровых процессов двигателя, что выгодно отличает ее от альтернативных технологий сокращения выбросов. Однако, несмотря на свою распространенность и апробированность в конструкциях энергетических установок, SCR имеет внушительные габариты, что создает определенные проблемы в его размещении и, кроме того, протекание каталитических реакций требует поддержания температурного режима, обеспе-

чение которого оказывается затруднительным на отдельных режимах низкой мощности, особенно для двухтактных двигателей. Кроме того, система требует постоянного использования реагентов, расход которых по стоимости может превышать 8 % стоимости используемого топлива, а использование дорогостоящих конструкций и материалов сказывается на инвестиционной стоимости установки. Весьма критичными являются требования к используемому топливу, система требует соблюдения ряда значимых условий, касающихся использования тяжелых высокосернистых топлив и компоновки систем очистки отработавших газов от оксидов серы; задействование системы сопряжено с дополнительными нагрузками на экипаж судна.



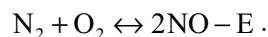
Рис. 1. Наиболее распространенные способы ограничения выбросов NO_x

Исходя из особенностей и недостатков систем каталитического восстановления оксидов азота, более привлекательными в использовании представляются системы EGR. Системы рециркуляции отработавших газов позволяют достичь соответствия третьему уровню стандарта выбросов NO_x без значительного роста эксплуатационных расходов, не накладывают ограничений на используемые виды топлив, компактно вписываются в конструкцию двигателя без существенного увеличения габаритов судовой энергетической установки, обеспечивают хорошую совместимость с другими методами очистки отработавших газов от вредных выбросов (включая SO_x , несгоревшие углеводороды и твердые частицы).

Рассматривая системы EGR, необходимо учитывать, что они в процессе работы оказывают опосредованное влияние на протекание всех стадий процесса сгорания в цилиндре ДВС. Несмотря на значительный интерес исследователей и высокую значимость для теории тепловых двигателей процессов тепловыделения, механизм сгорания углеводородов в камере сгорания двигателя представляется наименее изученным среди других процессов, составляющих цикл. Теоретическая база физики процессов горения, необходимая для расчетов и моделирования, сводится к полуэмпирическим зависимостям (см., например, [3]), в основу которых заложены общие предположения о развитии химических процессов. Большинство научных подходов к описанию процессов сгорания сводится к рассмотрению одно- или двухзонной моделей горения топливовоздушной смеси (зона компонентов смеси и зона продуктов реакции), что, в принципе, является весьма грубым приближением, поскольку фактически рассматриваемые процессы имеют гораздо более сложную многозонную

структуру [4]. В равной мере это относится и к теоретическим аспектам образования оксидов азота как неотъемлемой части процесса горения.

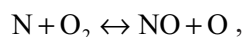
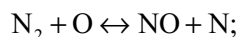
Оксиды азота NO_x — это обобщенное название монооксида NO и диоксида NO_2 , которые образуются при горении топливовоздушных смесей в различных условиях и устройствах. Основным элементом обобщенного вида NO_x в составе вредных компонентов отработавших газов поршневых ДВС является монооксид углерода, составляющий до 95 % от общей эмиссии NO_x . Формальная кинетика процесса образования монооксида описывается в виде



С учетом энергии деструктуризации молекулы кислорода 494 кДж/моль и энергии активации взаимодействия атомарного кислорода с молекулой азота 314 кДж/моль как основной реакции:



определяющей скорость процесса, энергетический барьер реакции образования NO составляет 516 кДж/моль. Такая весьма значительная энергия активации предопределяет экспоненциальную зависимость скорости образования NO от температуры. Таким образом, основные реакции образования оксидов азота связаны с высокой температурой в зонах горения. Исходя из этого механизм образования оксидов азота получил название *высокотемпературный*, или *тепловой (термический) механизм*. Фундаментальные основы механизма образования NO, включающего две элементарные стадии:



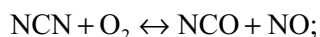
были заложены в середине прошлого века [5], [6].

Необходимо отметить, что теория образования «термических» оксидов азота, являясь основной и общепризнанной, не в полной мере отражает все процессы и, в частности, не объясняет регистрируемые в экспериментах повышенные концентрации монооксида азота во фронте пламени, где не достигается максимум температур, свойственный зоне продуктов сгорания. Также теория не объясняет тот факт, что появление оксидов азота во фронте пламени происходит вопреки существенному различию скоростей реакций (скорости образования NO, в соответствии с теорией образования термических оксидов азота, оказываются на два порядка ниже, чем скорость горения). В этой связи параллельно с теорией образования «термических» оксидов рассматривается механизм образования «быстрых» оксидов азота, предложенный в 1971 г. [7].

В соответствии с теорией «быстрых» оксидов образование NO связано с реакцией радикала CH, присутствующего на начальных стадиях деструктуризации углеводородов, с молекулярным азотом:



и далее инвариантно по сложной схеме реакций с участием различных радикалов, например:



Наряду с механизмами образования «термических» и «быстрых» оксидов азота рассматриваются также другие сценарии образования NO_x , основанные на различных постулатах, таких как развитие цепных реакций, согласно [8], превращение топливного азота [9], распад диоксида азота [10] и др. С учетом многообразия предлагаемых механизмов образования NO_x большинство исследователей сходятся во мнении, что в условиях, характерных для камеры сгорания дизельного

двигателя, термический механизм образования оксидов азота следует рассматривать как превалирующий [11]. Следствием такого допущения является основная направленность воздействия на внутрицилиндровые процессы ДВС с целью сокращения выбросов NO_x , которая состоит в максимально возможном сдерживании как динамики роста температур и достижимых максимальных температур в цикле, так и времени высокотемпературного воздействия на компоненты состава рабочего тела в цилиндре. На основе анализа влияния на скорости реакций различных факторов, главными среди которых являются температура процесса и концентрация окислителя, можно планировать такие мероприятия по специальной организации процесса сгорания, которые позволят добиться сокращения выбросов NO_x с отработавшими газами.

Температурное влияние на процессы образования NO_x (см. рис. 1) может быть оказано с помощью управления процессом топливоподачи, имеющим непосредственное влияние на тепловыделение в цилиндре двигателя и позволяющим обеспечить приемлемую динамику роста температур в ходе протекания внутрицилиндровых процессов. Сдерживания роста температур можно добиться путем введения в состав рабочего тела веществ, обладающих высокой теплоемкостью (например, воды или водяного пара). Определенные результаты в борьбе с выбросами оксидов азота могут достигаться понижением концентрации кислорода в воздухе, подаваемом в цилиндры двигателя благодаря применению мембранных технологий. Следует признать, что все эти методы, давая положительный результат по отдельности, не позволяют обеспечить в полной мере соответствие энергетической установки требованиям стандарта Tier III. Отличительной особенностью систем рециркуляции отработавших газов является то, что они оказывают двухфакторное влияние на процессы образования оксидов азота, одновременно снижая концентрацию кислорода в свежем заряде цилиндра и вводя в состав рабочего тела чистые продукты сгорания (пары воды и углекислый газ), обладающие высокой теплоемкостью, что обеспечивает EGR высокую эффективность борьбы с выбросами NO_x .

Необходимо отметить, что системы EGR имеют весьма продолжительную историю использования в высокооборотных двигателях автотранспортного назначения. Как следствие, большой накопленный опыт разработок, доводки конструкций и систем управления позволили достичь требуемых результатов. При этом рабочий процесс высокооборотного дизельного двигателя имеет отличительные черты, состоящие в кратковременном протекании и высокой динамике тепловыделения. Поэтому времени на образование оксидов азота в цикле оказывается существенно меньше, чем у малооборотных судовых двигателей. Такие особенности предопределяют лояльные требования по эмиссии NO_x , предъявляемые к малооборотным двигателям в соответствии со стандартом Tier II, составляющим 14,4 г/кВт·ч по сравнению с 7,7 г/кВт·ч для высокооборотных двигателей и 3,4 г/кВт·ч по сравнению с 2,0 г/кВт·ч по стандарту Tier III соответственно (см. табл. 1). Таким образом, адаптация технических приемов, применяемых в двигателях автомобильного класса к конструкциям судовых двигателей, требует отдельного внимания, более строгих подходов и принятия специфических решений [12].

Распространенной схемой системы EGR малоразмерных высокооборотных двигателей является «комбинированная система рециркуляции» с отбором отработавших газов повышенного давления из выпускного коллектора (перед турбиной) и подачей их через управляющий клапан в зону разряжения во впускном тракте перед компрессором, которая максимально упрощает конструкцию системы, обеспечивая ее компактное расположение в ограниченных объемах подкапотного пространства. В более сложных системах возможно использование теплообменных аппаратов с целью частичного охлаждения рециркулирующего газа. Такая компоновка системы приводит к облитерации всего впускного тракта двигателя твердыми частицами, входящими в состав отработавших газов. Образование крупных конгломератов твердых частиц в местах возникающих турбулентностей во впускных каналах несет определенные риски для работоспособности двигателя, так как в случае срыва образований потоком и при попадании в цилиндры твердые частицы способны помимо инициирования повышенных износов деталей цилиндропоршневой группы, седел и рабочих фасок

клапанов нанести двигателю критические повреждения, а именно привести к удару движущимся поршнем по открытому клапану со всеми вытекающими последствиями — изгибу, а в самых тяжелых случаях — к обрыву клапана. Такие риски совершенно недопустимы для двигателей судового назначения, которые должны поддерживать высокую работоспособность и длительные ресурсы работы. Поэтому конструктивные схемы систем EGR крупных судовых двигателей должны предусматривать очистку рециркулирующего газа, а для повышения эффективности системы — глубокое охлаждение газа. Одновременно объемы машинного отделения, несмотря на загруженность оборудованием судовой энергетической установки, в отличие от ограниченных объемов, выделенных для установки двигателя в автотранспортном средстве, предоставляют разработчику возможность более широкого маневра в компоновке системы.

Сдерживание роста средних температур подвода тепла и увеличение продолжительности тепловыделения за счет использования в составе свежего заряда цилиндра рециркулирующих отработавших газов оказывают отрицательное воздействие на топливную экономичность двигателя. По данным испытаний систем EGR большинства производителей ухудшение топливной экономичности может достигать до 4 %. Кроме того, сдерживание скорости сгорания путем воздействия на концентрации кислорода в рабочем теле цилиндра и снижение температурного уровня процессов в основных стадиях процесса переносят сгорание на линию расширения, что может повлиять на полноту сгорания цикловой подачи топлива и вызвать повышение содержания твердых частиц — дымности отработавших газов. Из этих негативных аспектов проблемы использования систем рециркуляции отработавших газов следует, что внедрение данной технологии сдерживания эмиссии NO_x требует дополнительной настройки рабочего процесса дизельного двигателя, которая может быть реализована только разработчиком.

Несмотря на наличие указанных негативных факторов влияния на эффективность и экологичность работы двигателя, все ведущие производители крупного судового энергетического оборудования занимаются разработкой и внедрением систем EGR в конструкции выпускаемых двигателей. В отличие от схемного решения, характерного для малоразмерных высокооборотных двигателей, подача рециркулирующего газа в цилиндры судовых ДВС производится автономными нагнетателями после промывки рециркулирующих газов от твердых частиц в скрубберных системах мокрого типа (с последующим влагоотделением). В этом случае появляется вариантность конструктивных схем организации систем EGR, которая подразделяет их на EGR низкого и высокого давления. Различие состоит в месте отбора отработавших газов для рециркуляции.

Наиболее ранние исследования и апробации систем EGR применительно к судовым модификациям двигателей в основном затрагивали системы низкого давления. В системах рециркуляции низкого давления отбор газа производят после утилизационных агрегатов (турбины турбокомпрессора, утилизационного котла и др.) с давлением, близким к атмосферному, и подают во впускной тракт между воздушным фильтром и компрессором. Такое решение позволяет в полной мере использовать энергию отработавших газов в утилизационных циклах и устройствах; исключить проблему эксплуатации компонентов системы, работающих под давлением; упростить функционирование системы в части точного дозирования за счет увеличенных объемов рециркулирующего газа и снизить эксплуатационные расходы. Однако данное решение приводит к увеличению габаритов системы и, как следствие, к сложностям компоновки, а также к высокой инвестиционной стоимости.

Результаты использования системы рециркуляции с газом низкого давления, принципиальная схема которой приведена на рис. 2, рассмотрены в [13] на примере судового малооборотного двухтактного двигателя 6UEC45LSE-Eco-B2 производства Mitsubishi Heavy Industries Machinery & Engine CO. Ltd (MHI–MME). Ввиду большого объема газа, участвующего в рециркуляции, системы низкого давления проявляют низкую динамику реагирования на изменение режимов работы двигателя, что создает сложности в управлении системой на переходных режимах и, как следствие, существенно усложняет построение алгоритмов управления.

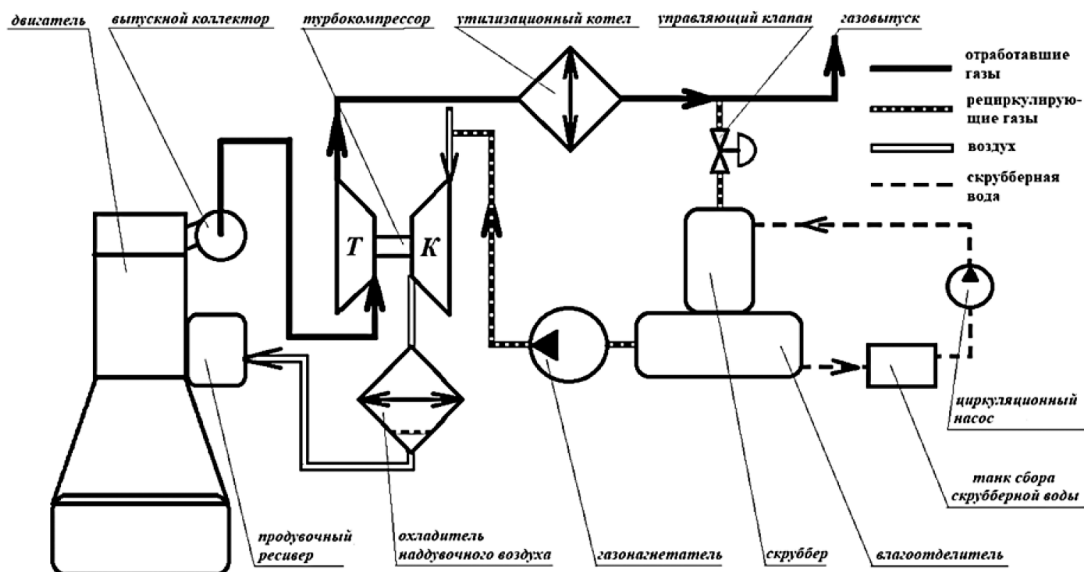


Рис. 2. Схема системы рециркуляции отработавших газов низкого давления

Системы рециркуляции отработавших газов высокого давления, в первую очередь, привлекают своей компактностью (рис. 3) и быстрым откликом на изменение режима работы двигателя, поэтому находятся под пристальным вниманием разработчиков. Наиболее показательными в этом плане являются разработки ведущего производителя судовых двигателей — MAN B&W [14].

а)

б)

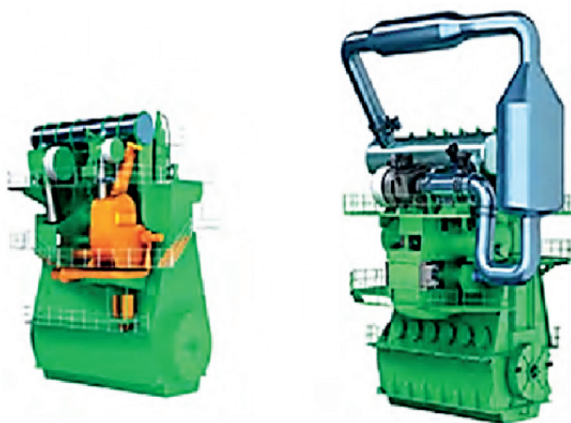


Рис. 3. Сопоставление компоновок двигателей с EGR высокого давления (а) и SCR высокого давления (б)

Система EGR высокого давления удобно интегрируется в конструкцию двигателя отдельным компактным модулем (см. рис. 3), практически не изменяя общие габариты установки, что выгодно отличает ее от системы низкого давления. Блок рециркуляции, встроенный в конструкцию двигателя подобно ресиверу продувочного воздуха (рис. 4), включает устройство для распыления промывочной воды (водораспыление), охладитель EGR, уловитель водяного тумана (устройство водоотделения) и нагнетатель рециркулирующего газа.

Схема системы рециркуляции отработавших газов высокого давления, разработанная MAN B&W для двухтактных двигателей с диаметром цилиндра до 700 мм с одним турбокомпрессором, приведена на рис. 5. Отбор газа производится непосредственно из выпускного коллектора под давлением, определяемым условиями работы системы свободного газотурбинного наддува. Устройство водораспыления, являясь аналогом скрубберной системы в составе EGR низкого давления, обе-

спечивает подачу воды для промывки рециркулирующего газа с удалением продуктов неполного сгорания топлива и твердых загрязнений. После охлаждения и отделения влаги рециркулирующий газ подается нагнетателем в точку смешения с воздухом и далее в продувочный ресивер. Система рециркуляции выключается запорным клапаном EGR, производительность системы (коэффициент рециркуляции) регулируется дроссельным клапаном вентилятора. В целях поддержания энергетического баланса турбокомпрессора и массового баланса двигателя и компрессора в системе предусмотрены байпасный клапан отработавших газов и перепускной воздушный клапан.

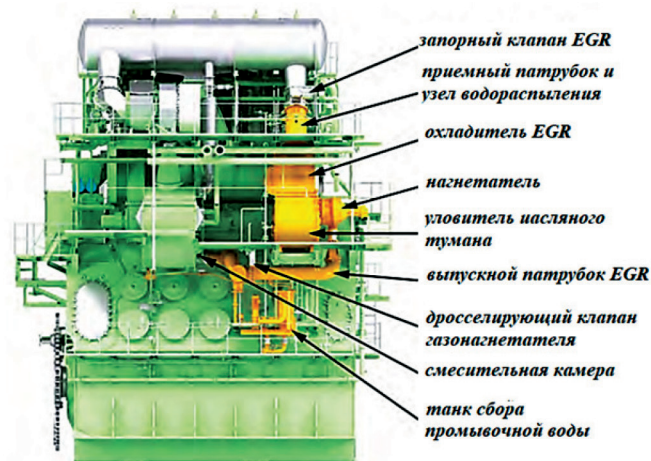


Рис. 4. Конструктивная схема EGR высокого давления

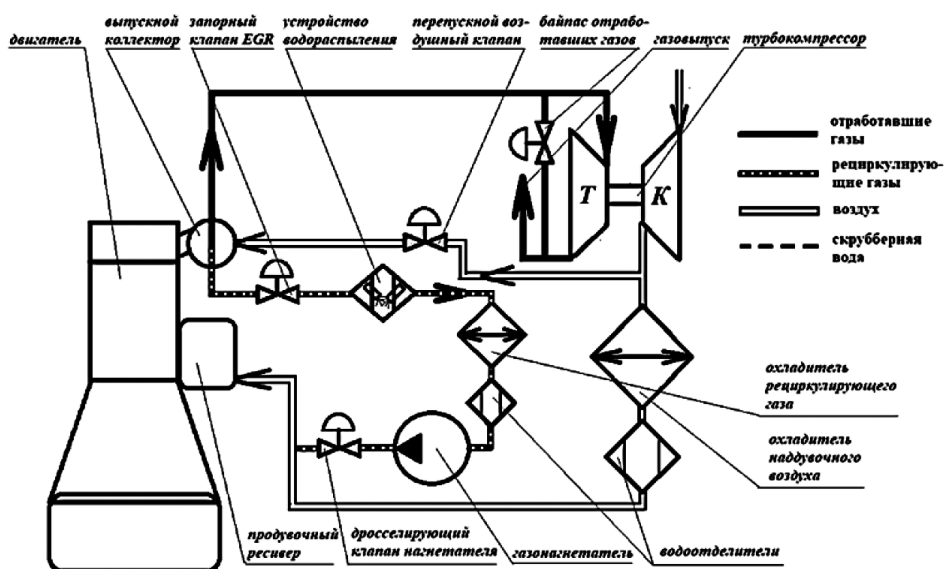


Рис. 5. Схема системы рециркуляции отработавших газов высокого давления MAN B&W

В случае использования нескольких турбокомпрессоров на более крупных двигателях размерного ряда принцип работы системы EGR не изменяется несмотря на отдельные конструктивные отличия. Для работы двигателя в режиме минимизации удельного эффективного расхода топлива доступен режим работы EсоEGR, при котором поддерживается максимально увеличенный коэффициент избытка воздуха для обеспечения улучшенных условий протекания внутрицилиндровых процессов смесеобразования и тепловыделения. Особенности управления клапанами системы для различных режимов указаны в табл. 2.

Таблица 2

Состояние управляющих клапанов системы EGR для различных режимов

Режим EGR						
	Tier II			Tier III		
Режим, мощность, %	Запорный клапан и дросселирующий клапан нагнетателя EGR	Перепускной воздушный клапан	Байпас отработавших газов	Запорный клапан и дросселирующий клапан нагнетателя EGR	Перепускной воздушный клапан	Байпас отработавших газов
100	Закрыты	Закрыт	Открыт	Открыты	Открыт	Закрыт
75			Частично открыт			
50					Закрыт	
25						
Режим Eco EGR						
100	Открыты	Закрыт	Открыт	Открыты	Открыт	Закрыт
75			Закрыт			
50					Закрыт	
25						

В обычном режиме работы двигателя для обеспечения стандарта уровня Tier II линия рециркуляции отработавших газов отключена закрытием запорного клапана и дросселирующего клапана нагнетателя EGR. В этом режиме соответствие требованию стандарта достигается регулировками двигателя, при этом клапан байпаса отработавших газов полностью открыт при высоких нагрузках двигателя и частично открывается на малых нагрузках для балансировки турбокомпрессора. Для обеспечения соответствия стандарта уровня Tier III линия рециркуляции активируется открытием запорного клапана EGR и дросселирующего клапана нагнетателя рециркулирующих газов. Рециркулирующий газ направляется в устройство водораспыления и далее в точку смешения с воздухом к продувочному ресиверу. Байпас перепуска воздуха открыт при больших нагрузках на двигатель перепускным воздушным клапаном, а байпас отработавших газов закрыт, что позволяет увеличивать давление продувочного воздуха.

Система EGR работает постоянно, вне зависимости от района плавания. Скорость рециркуляции адаптируется к предельным значениям выбросов NO_x для соответствующего региона. Благодаря оптимизации регулировок двигателя по параметрам рабочего процесса обеспечивается сокращение удельного эффективного расхода топлива около 2,5 % для режима поддержания Tier II и 1,0 % — для Tier III. При переходе двигателя в режим работы EGR ограничения по стандарту Tier II обеспечиваются при включенной линии рециркуляции отработавших газов, клапаны на линии рециркуляции открыты, поддерживая низкий коэффициент рециркуляции в пределах 10–15 %. Для соблюдения требований стандарта Tier III коэффициент рециркуляции отработавших газов увеличивается до 25–45 %, при этом управляющие клапаны системы работают идентично ранее рассмотренному обычному режиму: запорный клапан EGR и дросселирующий клапан нагнетателя открыты, также в открытом состоянии находится перепускной воздушный клапан (за исключением режимов малых нагрузок), перепускной клапан отработавших газов закрыт.

Удельный эффективный расход топлива двигателя с системой EGR, работающего в режиме Tier II, аналогичен расходу базового двигателя (без системы EGR) с соответствующими настройками рабочего процесса. Когда двигатель с рециркуляцией отработавших газов работает в режиме Tier III, удельный эффективный расход топлива будет увеличен по сравнению с режимом Tier II, как показано на рис. 6, ввиду особенностей процесса тепловыделения при сгорании топлива в среде, обедненной кислородом и содержащей газы, обладающие высокой теплоемкостью.

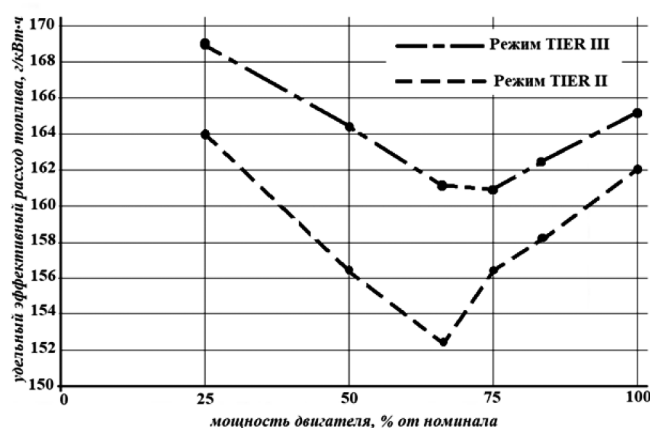


Рис. 6. Сравнение характеристик двигателя с EGR для различных режимов работы

Концепция Eсо EGR обеспечивает снижение расхода топлива за счет оптимизации удельного эффективного расхода топлива как в режиме Tier II (рис. 7, а), так и в режиме Tier III (рис. 7, б). По сравнению с двигателем с EGR двигатель с Eсо EGR обеспечивает снижение удельного эффективного расхода топлива по характеристике в среднем на 2–4 г/кВт · ч и на 0–3 г/кВт · ч для режимов Tier II и Tier III соответственно.

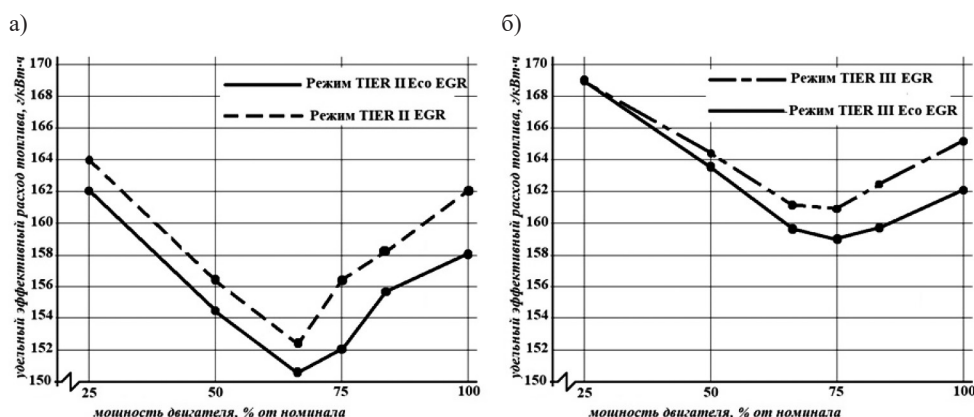


Рис. 7. Сопоставление характеристик двигателя с EGR и Eсо EGR

Таким образом, системы EGR, вне зависимости от схемы компоновки, при коэффициенте рециркуляции более 30 % гарантированно поддерживают требования экологических стандартов по выбросам оксидов азота при работе в зонах контроля (Tier III) при неизбежном (менее 4 %) ухудшении топливной экономичности энергетической установки, обеспечивая минимум эксплуатационных затрат.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Постоянное ужесточение требований стандартов экологической безопасности судовых двигателей внутреннего сгорания побуждает производителей к постоянному поиску новых решений, направленных на снижение суммарных выбросов вредных компонентов с отработавшими газами.
2. Важнейшим направлением обеспечения экологической безопасности судовых ДВС является ограничение выбросов оксидов азота как основного компонента суммарной эмиссии вредных веществ.
3. В настоящее время разрабатывается большое количество технологий по борьбе с выбросами NO_x , однако добиться полного соответствия действующим стандартам экологической безопасности

гарантированно позволяют только системы рециркуляции отработавших газов и системы каталитического восстановления.

4. Технологии рециркуляции отработавших газов, по сравнению с распространенной технологией селективного каталитического восстановления оксидов азота, имеют ряд преимуществ, среди которых низкие эксплуатационные затраты (практическое отсутствие расхода реагентов), отсутствие отдельных требований к используемому топливу (для SCR предъявляются особые условия использования сернистых топлив), компактность — система не занимает дополнительных объемов машинного отделения. При этом системы рециркуляции своей работой снижают эффективность двигателя и потенциально способны оказать негативное влияние на его ресурсные показатели, для EGR устанавливаются особые требования к хранению производимого шлама.

5. Системы EGR высокого давления обладают высокой привлекательностью и имеют наименьшие габариты по сравнению с системами EGR низкого давления, реализуя быстрый отклик на изменение условий работы, но при этом усложняют конструктивные элементы процессов обработки рециркулирующего газа и снижают работоспособность газов перед турбиной.

6. Как показывают исследования MAN B&W, системы EGR обладают определенным потенциалом в плане минимизации ущербов, наносимых параметрам и конструкции двигателя. Так, реализация концепции Eсо EGR позволяет достичь некоторой компенсации потерь топливной экономичности двигателя с системой EGR, вызванной опосредованным влиянием на процессы тепловыделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Техническое обеспечение для соответствия судовых энергетических установок новым требованиям 2021 г. по выбросам оксидов азота / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.
2. Петров А. П. Технологии достижения новых требований по выбросам оксидов азота судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2021. — № S1. — С. 83–85. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-1-83-85.
3. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. — М.: Машгиз, 1962. — 173 с.
4. Лашко В. А. Образование выбросов отработавших газов и управление процессом сгорания в поршневом двигателе / В. А. Лашко, И. Ю. Привальцев // Ученые заметки ТОГУ. — 2014. — Т. 5. — № 1. — С. 324–337.
5. Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — 145 с.
6. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. — М.: Наука, 1980. — 479 с.
7. Fenimore C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames / C. P. Fenimore // Symposium (international) on combustion. — Elsevier, 1971. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 373–380. DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1.
8. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрыва / Н. Н. Семенов // Успехи физических наук. — 1940. — Т. 24. — Вып. 4. — С. 433–486. DOI: 10.3367/UFN.0024.194008a.0433.
9. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. — М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2003. — 352 с.
10. Шаулов Ю. Х. Горение в жидкостных ракетных двигателях / Ю. Х. Шаулов, М. О. Лернер. — М.: Оборонгиз, 1961. — 195 с.
11. Гришанов П. А. Физико-химические процессы образования окислов азота в дизельном двигателе (обзор состояния вопроса) / П. А. Гришанов // Символ науки. — 2023. — № 5–2. — С. 27–33.
12. Мельник Г. В. Технологии для достижения требований ИМО Tier III (по материалам конгресса СИМАК) / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2020. — № 4 (282). — С. 41–57.
13. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

14. Emission project guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. — Copenhagen SV, Denmark: MAN Energy Solutions, 2019. — 110 p.

REFERENCES

1. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Technical support for ship power plants compliance with the new requirements for nitrogen oxide emissions in 2021." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.
2. Petrov, A. P., and G. E. Zhivlyuk. "Technologies for achieving new requirements for emissions of nitrogen oxides by marine power plants." *Transactions of the Krylov state research centre* S1 (2021): 83–85. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-83-85.
3. Vibe, I. I. *Novoe o rabochem tsikle dvigatelei*. M.: izd-vo MASHGIZ, 1962.
4. Lashko, V. A., and I. Y. Privaltsev. "Education exhaust emissions and control process combustion piston engine." *Scientists notes PNU* 5.1 (2014): 324–337.
5. Zel'dovich, Ya. B., P. Ya. Sadovnikov, and D. A. Frank-Kamenetskii. *Okislenie azota pri gorenii*. M.: Izd-vo AN SSSR, 1947.
6. Zel'dovich, Ya. B., G. I. Barenblatt, V. B. Librovich, and G. M. Makhviladze. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva*. M.: Nauka, 1980.
7. Fenimore, Charles P. "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames." *Symposium (international) on combustion*. Vol. 13. No. 1. Elsevier, 1971. 373–380. DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1.
8. Semenov, N. N. "Teplovaya teoriya goreniya i vzryva." *Uspekhi fizicheskikh nauk* 24.4 (1940): 433–486. DOI: 10.3367/UFNr.0024.194008a.0433
9. Warnatz, J., Ulrich Maas, and Robert W. Dibble. *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. 4th edition. Springer, 2006.
10. Shaulov, Yu. Kh., and M. O. Lerner. *Gorenie v zhidkostnykh raketnykh dvigatelyakh*. M.: Gos.nauch.-tekhn. izd-vo OBORONGIZ, 1961.
11. Grishanov, P. A. "Fiziko-khimicheskie protsessy obrazovaniya okislov azota v dizel'nom dvigatele (obzor sostoyaniya voprosa)." *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* 5–2 (2023): 27–33.
12. Mel'nik, G. V. "Tekhnologii dlya dostizheniya trebovaniy IMO Tier III (po materialam kongressa CIMAK)." *Dvigatelsestroenie* 4(282) (2020): 41–57.
13. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
14. Emission project guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. Copenhagen SV, Denmark: MAN Energy Solutions, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Petrov, Aleksandr P. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 28 июля 2023 г.
Received: July 28, 2023.

SIMULATION OF ENERGY LOSSES IN AN INFLOW TURBINE WITH PARTIAL BLADING OF THE RUNNER

A. A. Kryukov¹, S. V. Kulichkov², A. A. Ratnikov²

¹ — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

² — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Studying the coefficients of kinetic energy losses of the nozzle diaphragm and the runner in an inflow turbine with partial blading of the runner is carried out. It is noted that inflow low-consumption turbines are reliable and productive devices designed to drive various units. Due to their compact size, they are especially in demand in various branches of mechanical engineering. However, in order to increase efficiency and reduce production costs, it is necessary to constantly improve the technology of manufacturing turbine stages. Some inflow turbines are partial, which leads to additional energy losses. Partial stages in which there are no losses from ventilation, namely, turbines with partial flapping of the runner are considered. To simulate such turbines, the ANSYS CFX software package is used in the work. By using ANSYS Design Modeler to create a geometric model and determine boundary conditions, as well as selecting the appropriate grid, the dependences of the loss coefficients in the nozzle and the runner are obtained. The study has shown that the degree of partiality and the Mach number of the turbine stage have a significant impact on the losses coefficients in the exact part of the nozzle and the runner. To account for these dependencies in the modeling process, empirical dependencies, which are an integral part of the design process of inflow turbines, are obtained. The use of the obtained empirical dependencies makes it possible to more accurately predict the characteristics and performance of turbines of this type, as well as to supplement the existing mathematical model of the flow in the flow part of a low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner.

Keywords: nozzle diaphragm, losses coefficient, runner, kinetic energy, numerical method, experiment, calculation grid, gas dynamics, low-consumption turbine.

For citation:

Kryukov, Aleksey A., Sergei V. Kulichkov, and Alexander A. Ratnikov. "Simulation of energy losses in an inflow turbine with partial blading of the runner." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-858-866.

УДК 621.515.001.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЕ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

А. А. Крюков¹, С. В. Куличков², А. А. Ратников²

¹ — ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
г. Владивосток, Российская Федерация

В работе выполнено исследование коэффициентов потерь кинетической энергии соплового аппарата и рабочего колеса в центростремительной турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса. Отмечается, что центростремительные малорасходные турбины являются надежными и производительными устройствами, предназначенными для привода различных агрегатов. Благодаря компактным размерам они особенно востребованы в различных отраслях машиностроения. Однако для повышения эффективности и снижения затрат на производство необходимо постоянное совершенствование технологии изготовления ступеней турбин. Часть центростремительных турбин являются парциальными, что приводит к дополнительным потерям энергии. Рассмотрены парциальные ступени, в которых отсутствуют потери от вентиляции, — турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса. Для моделирования таких турбин в работе использован программный пакет ANSYS CFX. Путем использования ANSYS Design Modeler

для создания геометрической модели и определения граничных условий, а также выбора соответствующей сетки были получены зависимости коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе. Исследование показало, что степень парциальности и число Маха ступени турбины оказывают существенное влияние на коэффициенты потерь в проточной части соплового аппарата и рабочего колеса. Для учета этих зависимостей в процессе моделирования получены эмпирические зависимости, являющиеся неотъемлемой частью процесса проектирования центробежных турбин. Использование полученных эмпирических зависимостей позволяет более точно прогнозировать характеристики и производительность турбин данного типа, а также дополнить существующую математическую модель течения потока в проточной части малорасходной центробежной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Ключевые слова: сопловой аппарат, коэффициент потерь, рабочее колесо, численный метод, расчетная сетка, газодинамика, малорасходная турбина.

Для цитирования:

Крюков А. А. Моделирование потерь энергии в центробежной турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Куличков, А. А. Ратников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-858-866.

Введение (Introduction)

Развитие мирового водного транспорта направлено на повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности грузоперевозок. В связи с этим одной из ключевых задач является поиск методов улучшения эффективности корабельных энергетических комплексов [1], [2]. Внедрение устройств утилизации сбросной теплоты, таких как утилизационные котлы и турбогенераторы в судовых силовых установках, может оказать положительное влияние на экономические и экологические показатели этих систем [3]. С развитием подводной техники для освоения Мирового океана возникает потребность в энергонезависимых и компактных устройствах. В этом случае особую актуальность приобретают малорасходные турбины [4], так как они обеспечивают надежное энергоснабжение подводных аппаратов, выполняющих задачи по поиску, исследованию и добыче полезных ископаемых, биоресурсов и изучению живой природы. Один из способов повышения эффективности судовых энергетических систем заключается в совершенствовании устройств, утилизирующих энергию отработавших газов.

Развитие эффективных судовых энергетических установок является важным шагом в направлении модернизации водного транспорта. Использование энергетических ресурсов с помощью утилизационных котлов и турбогенераторов в судовых системах позволяет достичь более высоких показателей эффективности и экологической безопасности. Малорасходные турбины являются одной из наиболее важных инноваций в области энергетики. Исследования в этой области активно ведутся как в России, так и за рубежом. Научные работы, опубликованные в российских [5], [6] и иностранных [7]–[9] научных изданиях, посвящены изучению перетекания потока газообразной среды и применению численных методов в этой области.

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность малорасходных турбин, является их способность эффективно использовать энергию газообразной среды. Численные методы позволяют исследовать и оптимизировать процессы перетекания потока газа внутри турбины, что помогает повысить ее эффективность. Вместе с тем исследования в области малорасходных турбин не ограничиваются только энергетикой. Такие турбины находят применение в газотурбинных двигателях, используемых в авиации, на флоте, а также в других отраслях промышленности. Исследования в этой области могут привести к созданию более эффективных и экологически чистых технологий.

Исследования малорасходных турбин с применением численных методов представляют собой важную область научно-технического прогресса. Работы, опубликованные в российских и иностранных научных изданиях, позволяют расширить знания в этой области и сделать шаг вперед в разработке более эффективных и экологически чистых технологий. При установившемся режиме течения рабочего тела в проточной части турбинной ступени коэффициент профильных потерь является функцией следующих критериев:

$$\zeta_{\text{пр}} = f\left(\alpha_0, M, \text{Re}, E, \alpha_{0p}, \alpha_{1p}, \frac{t}{b}, \frac{b}{r_1}, \alpha_{\text{уст}}, \frac{d_0}{\alpha_0}, \frac{d_1}{\alpha_1}\right). \quad (1)$$

В упрощенном виде данную функцию можно представить в виде

$$\zeta_{\text{пр}} = \zeta_{\text{тр}} + \zeta_{\text{кр}} + \Delta\zeta(M) + \Delta\zeta(\text{Re}) + \Delta\zeta(i). \quad (2)$$

Коэффициент $\Delta\zeta(M)$ учитывает влияние числа Маха на профильные потери в проточной части соплового аппарата и рабочего колеса. Так как проведение физических экспериментов с малорасходными турбинами сопряжено с объективными проблемами, замена физического эксперимента численным позволяет получить математические зависимости, которые могут отражать влияние коэффициента $\Delta\zeta(M)$ на общие профильные потери.

Целью исследования является определение зависимости потерь кинетической энергии потока в каналах соплового аппарата и рабочего колеса центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса от степени парциальности и числа Маха.

Задачи исследования:

- определение коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе на основе проведенных ранее экспериментов в данной области [10]–[12];
- определение зависимости потерь кинетической энергии от парциальности и числа Маха и аппроксимация значений коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе турбины ступени.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работах [10]–[12], выполненных на базе Лаборатории компьютерного моделирования Отделения машиностроения и морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института (Школы ДВФУ), исследованы модели, в которых коэффициенты скорости соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) были определены в ходе эксперимента на имитационном стенде с использованием программного обеспечения ANSYS Workbench 17, установленного на моноблоках Lenovo Intel(R) Core (TM) i3–4160T CPU @ 3.10 GHz / 8 Гб ОЗУ с операционной системой Windows 10 × 64. С помощью CAD-моделирования были построены геометрические модели ступеней с различной степенью парциальности. На рис. 1 показаны эти ступени, расположенные в порядке увеличения степени парциальности начиная с $\varepsilon = 0,059$ (одна рабочая лопатка с двумя рабочими каналами) и заканчивая полноподводной турбиной $\varepsilon = 1,000$ (с полным облопачиванием рабочего колеса).

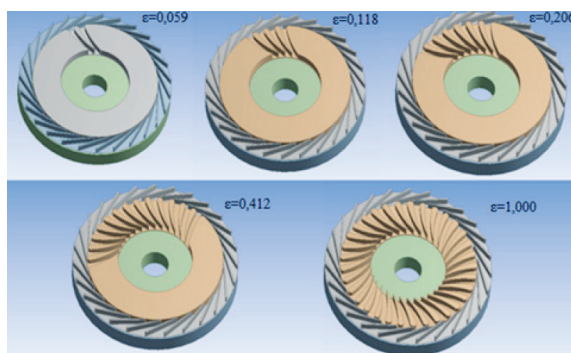


Рис. 1. Трехмерные модели турбинных ступеней

Для достижения точных результатов необходимо иметь надежную расчетную сетку. В этой статье рассматривается процесс создания расчетной сетки с использованием сеткогенератора ANSYS Meshing и ее применение в моделировании турбинных ступеней. Данный инструментальный позволяет создавать качественные расчетные сетки для сложных геометрических моделей. Он оснащен большим набором инструментов, дающих возможность оптимизировать сетку под конкретные требования и условия задачи.

При создании расчетной сетки для моделирования турбинной ступени необходимо соблюдение следующих основных условий: во-первых, сетка должна быть достаточно плотной ввиду основных особенностей геометрии и потока; во-вторых, необходимо учитывать граничные условия, такие как параметры торможения, рабочее тело, параметры на выходе и частота вращения, которые должны быть выбраны на основе ранее проведенных исследований и требований конкретной задачи.

ANSYS Meshing предоставляет возможность создания качественных сеток с учетом этих особенностей. Одним из преимуществ его использования является способность к автоматизации процесса создания расчетной сетки, который позволяет оптимизировать сетку с учетом заданных критериев качества и требований к точности расчетов. Это позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на создание сетки, и повысить ее качество. После создания расчетной сетки можно приступить к проведению газодинамических расчетов.

Полученные данные позволяют более точно оценить характеристики потока в турбинной ступени, такие как распределение давления, температуры и скорости, что, в свою очередь, позволит улучшить производительность и эффективность турбинной ступени, а также оптимизировать ее конструкцию.

Результаты (Results)

В работе [11] проведены исследования, направленные на определение значений коэффициента φ (коэффициента скорости СА) и ψ (коэффициента скорости РК). Для определения значений коэффициентов потерь в СА и РК использованы следующие формулы:

– коэффициент потерь в СА:

$$\zeta_{CA} = 1 - \varphi^2. \quad (3)$$

– коэффициент потерь в РК:

$$\zeta_{PK} = 1 - \psi^2. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов потерь в СА для ступени с частичным облопачиванием РК в диапазоне изменения степени парциальности от 0,059 до 1,00.

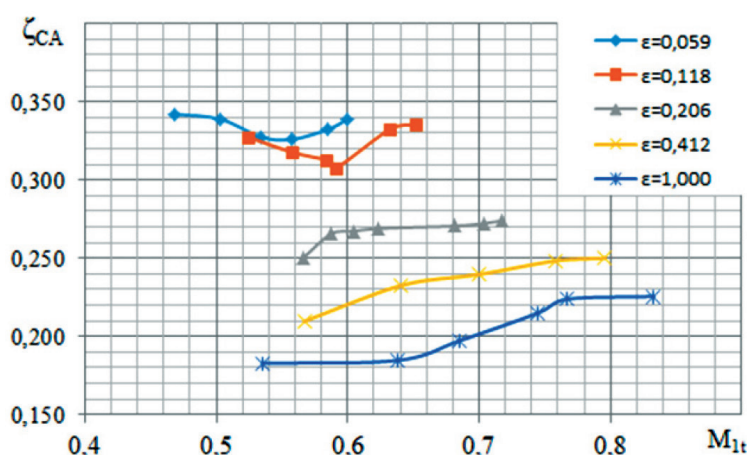


Рис. 2. Двухмерная зависимость коэффициента потерь в сопловом аппарате от числа Маха (M_{1t})

Графики зависимости коэффициента потерь в СА представляют собой визуальное отображение потерь энергии, которое может быть использовано для создания полиномов, выражающих зависимость ζ_{CA} от параметров M_{1t} и ϵ . Коэффициент потерь в СА может быть выражен в виде функции M_{1t} для каждой степени парциальности в диапазоне от 0,059 до 1,00 и в виде функции ϵ для соответствующего числа Маха:

– для диапазона M_{lr} от 0,47 до 0,60

$$\zeta_{CA} (\epsilon = 0,059) = 49,143M_{lr}^3 - 75,975M_{lr}^2 + 38,866M_{lr}; \quad (5)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,52 до 0,65

$$\zeta_{CA} (\epsilon = 0,118) = -18,252M_{lr}^3 + 37,108M_{lr}^2 - 24,560M_{lr}; \quad (6)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,57 до 0,72

$$\zeta_{CA} (\epsilon = 0,206) = 28,945M_{lr}^3 - 57,142M_{lr}^2 + 37,567M_{lr}; \quad (7)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,57 до 0,80

$$\zeta_{CA} (\epsilon = 0,412) = 2,829M_{lr}^3 - 6,436M_{lr}^2 + 4,971M_{lr}; \quad (8)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,53 до 0,83

$$\zeta_{CA} (\epsilon = 1,00) = -8,151M_{lr}^3 + 17,038M_{lr}^2 - 11,543M_{lr}. \quad (9)$$

Математическая модель, позволяющая определить коэффициент потерь в СА в зависимости от двух факторов (ϵ и M_{lr}) в соответствующем диапазоне M_{lr} (5)–(9), является важным инструментом данного исследования. На рис. 3 представлена двухпараметрическая зависимость $\zeta_{CA} = f(\epsilon, M_{lr})$, которая может быть аппроксимирована кубическим полиномом:

$$\begin{aligned} \zeta_{CA} (\epsilon, M_{lr}) = & 1,511 - 0,446\epsilon - 5,804M_{lr} + 1,397\epsilon^2 - 1,635\epsilon M_{lr} + \\ & + 9,869M_{lr}^2 - 0,501\epsilon^3 - 0,596\epsilon^2 M_{lr} + 1,902\epsilon M_{lr}^2 - 5,549M_{lr}^3. \end{aligned} \quad (10)$$

Такая модель позволяет более точно оценить значение ζ_{CA} для различных комбинаций значений ϵ и M_{lr} . Полиномиальное приближение позволяет учесть нелинейные эффекты и улучшить точность моделирования.

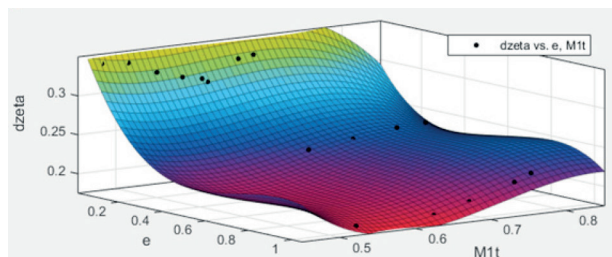


Рис. 3. Трехмерная зависимость коэффициента потерь в сопловом аппарате от числа Маха M_{lr} и степени парциальности ϵ

На рис. 2 видно, что максимальное значение ζ_{CA} достижимо для ступеней с минимальными значениями степени парциальности ϵ . Аналогичным образом определяется эмпирическая зависимость для коэффициента потерь в РК (рис. 4).

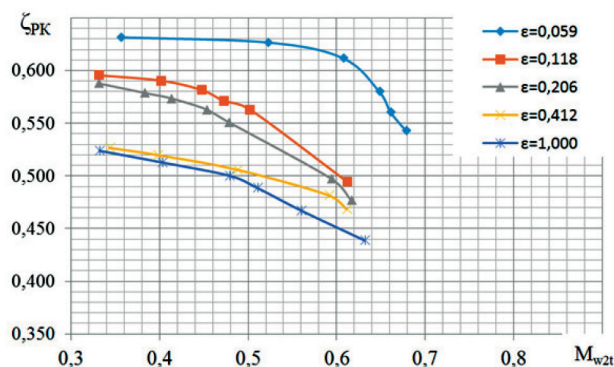


Рис. 4. Двухмерная зависимость коэффициента потерь в рабочем колесе от числа Маха (M_{w2r})

Коэффициент потерь кинетической энергии рабочего колеса ζ_{PK} является важным параметром в анализе эффективности работы турбинных ступеней. Зависимости $\zeta_{PK} = f(M_{w2t})$ и $\zeta_{PK} = f(\epsilon)$ позволяют оценить эти потери и могут быть представлены с помощью полиномов:

– для диапазона M_{w2t} от 0,36 до 0,68

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,059) = -1,077M_{w2t}^3 + 1,951M_{w2t}^2 - 1,399M_{w2t} + 0,931; \quad (11)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,33 до 0,61

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,118) = -1,307M_{w2t}^3 + 0,408M_{w2t}^2 + 0,153M_{w2t} + 0,547; \quad (12)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,33 до 0,62

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,206) = -2,025M_{w2t}^3 + 1,802M_{w2t}^2 - 0,686M_{w2t} + 0,691; \quad (13)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,34 до 0,61

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,412) = -3,691M_{lt}^3 + 4,714M_{lt}^2 - 2,123M_{lt} + 0,849; \quad (14)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,33 до 0,63

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 1,00) = 0,311M_{lt}^3 - 1,163M_{lt}^2 + 0,613M_{lt} + 0,436. \quad (15)$$

В целом анализ зависимостей $\zeta_{PK} = f(M_{w2t})$ и $\zeta_{PK} = f(\epsilon)$ с использованием кубических полиномов предоставляет ценные инструменты для оптимизации работы турбинных ступеней и может быть дополнен двухпараметрическим полиномом $\zeta_{PK} = f(M_{w2t}, \epsilon)$:

$$\begin{aligned} \zeta_{PK}(\epsilon, M_{w2t}) = & 0,516 - 0,044M_{w2t} - 0,037\epsilon + 0,044M_{w2t}^2 + 0,0048\epsilon \times \\ & \times M_{w2t} - 0,006\epsilon^2 - 0,014M_{w2t}^3 - 0,0017M_{w2t}^2\epsilon - 0,0017\epsilon^2M_{lt} + 0,0058\epsilon^3. \end{aligned} \quad (16)$$

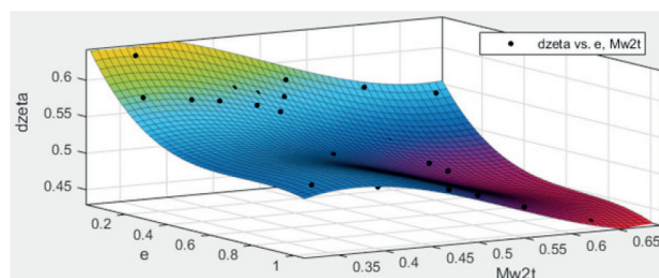


Рис. 5. Трехмерная зависимость коэффициента потерь в РК от числа Маха M_{w2t} и степени парциальности ϵ

На рис. 5 представлена графическое отображение двухпараметрической зависимости $\zeta_{PK} = f(\epsilon, M_{w2t})$. Аппроксимация результатов численного эксперимента позволяет получить не только математические зависимости, но и их графическое отображение.

Обсуждение (Discussion)

В ходе исследования проведен численный эксперимент и проанализированы полученные данные с расчетами по соответствующим формулам. Результаты работы показали, что применение математических зависимостей определения коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе посредством универсальных полиномов в рамках действующей математической модели [13] являются адекватными, так как отклонение интегральной характеристики (КПД), полученной в ходе физического эксперимента с результатами математического расчета, не превышает 2,4 %.

Исследование имеет большое практическое значение, так как позволяет определить дополнительные потери от числа Маха для центростремительной турбины с частичным оборачиванием рабочего колеса. Это особенно важно при проектировании и эксплуатации энергетических установок, где эффективность и надежность работы турбин являются ключевыми факторами. Дальнейшие

исследования могут быть направлены на совершенствование моделей путем учета дополнительных факторов, которые могут оказывать влияние на работу турбин.

Выводы (Summary)

На основе анализа проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Получены математические полиномиальные зависимости коэффициентов потерь энергии в сопловом аппарате и рабочем колесе для каждой степени парциальности $\zeta_{CA} = f(\epsilon, M_{1r})$ и $\zeta_{PK} = f(\epsilon, M_{w2r})$, позволяющие дополнить и модернизировать действующую математическую модель.
2. С помощью применения метода аппроксимации были получены двухпараметрические зависимости коэффициентов потерь в СА и РК в виде кубических полиномов, которые позволяют определить значения потерь энергии в зависимости от некоторого диапазона числа Маха при конкретной парциальности ступени.
3. Полученные полиномиальные зависимости могут быть использованы для проведения расчетов проточной части с турбинной ступенью данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев А. В. Повышение эффективности судовых энергетических установок / А. В. Соловьев, М. М. Чиркова, Н. Ф. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 4. — С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106.
2. Ерофеев В. Л. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580.
3. Абул К. А. Оценка возможностей утилизационных установок главных двигателей крупнотоннажных судов транспортного флота / К. А. Абул // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 1. — С. 121–125.
4. Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.
5. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.
6. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин, Г. Л. Раков, В. А. Рассохин, А. А. Себедев, М. В. Смирнов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.
7. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olenikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.
8. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyayev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.
9. Smirnov M. V. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017–100.
10. Крюков А. А. Трехмерное численное моделирование малорасходной центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

11. Крюков А. А. Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

12. Крюков А. А. Численное исследование течения потока в ступени центробежной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–1 (50). — С. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

13. Чехранов С. В. Математическая модель радиальной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / С. В. Чехранов, Р. Р. Симашов // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 222–226.

REFERENCES

1. Soloviev, Alexey Valerievich, Margarita Makarovna Chirkova, and Nikolay Frolovich Popov. “Improving the efficiency of ship power plants.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2018): 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106.

2. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017).

3. Abul, Kalam Azad. “Estimation of possibilities of heat recovery plants of the propulsion engines of large-capacity vessels of transport fleet.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2019): 121–125.

4. Matvienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

5. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassokhin. “Raschet trehmernogo techeniya v stupenjah malorashodnykh turbin.” *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(142) (2012): 65–70.

6. Zabelin, N. A., G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, and M. V. Smirnov. “Research of flow characteristics in low flow rate LPI turbine stages.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 1(166) (2013): 45–53.

7. Rassokhin, V., N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, and A. Sebelev. “The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines.” *Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover*. Polytechnical University Publishing House, 2014. 139–155.

8. Rakov, Gennadiy, Viktor Rassokhin, Nikolay Zabelin, Sergey Olennikov, Aleksandr Sebelev, Aleksandr Sukhanov, and Sergey Schislyayev. “A Low Emission Axial-Flow Turbine for the Utilization of Compressible Natural Gas Energy in the Gas Transport System of Russia.” *International Journal of environmental & science education* 11.18 (2016): 11721–11733.

9. Smirnov, M. V., A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, and N. I. Kuklina. “Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I.” *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*. Stockholm, Sweden. 2017.

10. Kriukov, Aleksei Alekseevich, and Sergei Valentinovich Chekhranov. “Three-dimensional numerical simulation of low-consumption inflow turbine with partial blading of runner.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2021): 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

11. Kryukov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. “Comparison of the velocity coefficients values in the turbine stage with partial blading of the runner.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

12. Kryukov, A. A., and S. V. Chekhranov. “Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel.” *Marine intellectual technologies* 4–1(50) (2020): 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

13. Chekhranov, S., and R. Simashov. “Mathematical model of a radial-flow low-consumption turbine having partially bladed wheel rotor.” *Transport business of Russia* 6 (2015): 222–226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Алексей Алексеевич —

старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный
технический рыбохозяйственный университет»

690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, 52б

e-mail: aleksey902@mail.ru

Куличков Сергей Владимирович —

кандидат технических наук, доцент

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет»

690922, Российская Федерация, г. Владивосток,
остров Русский, п. Аякс, д. 10

e-mail: seku230@yandex.ru

Ратников Александр Александрович —

заведующий лабораторией компьютерного
моделирования

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет»

690922, Российская Федерация, г. Владивосток,
остров Русский, п. Аякс, д. 10

e-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kryukov, Aleksey A. —

Senior lecturer

Far Eastern State Technical Fisheries
University

52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation

e-mail: aleksey902@mail.ru

Kulichkov, Sergei V. —

PhD, associate professor

Far Eastern Federal University

10 Ajax Bay, Russky Island,
Vladivostok, 690922,
Russian Federation

e-mail: seku230@yandex.ru

Ratnikov, Alexander A. —

Head of the Laboratory
of Computer Modeling

Far Eastern Federal University

10 Ajax Bay, Russky Island,
Vladivostok, 690922,
Russian Federation

e-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 24 августа 2023 г.

Received: August 24, 2023.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-867-875

MATHEMATICAL MODELING OF ROBUST AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MAGNETIC LEVITATION WITH UNCERTAIN PARAMETERS

A. G. Korobeynikov^{1,2}, A. P. Nyrkov³

¹ — ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

² — SPbF IZMIRAN, St. Petersburg, Russian Federation

³ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The topic of the research is the development of automated control systems for real processes, which must satisfy various requirements, for example, resistance to unmodeled dynamics (robust stability), as well as meet the required quality of transient processes that arise in the case of external disturbances of various natures. In this regard, there is a need to create appropriate mathematical models for the control of non-stationary objects, the model of which includes uncertain parameters. The problem of developing and studying a mathematical model for controlling the process of electrodynamic magnetic levitation, the main problem of which is dynamic stability, is considered. It is noted that systems using the effect of magnetic levitation are widely used, for example, in shipbuilding, in elements of ship mechanisms, instrument making, as well as in the transportation of various cargoes. The relevance of the work related to the need to develop such automatic control systems that can suppress the emerging oscillatory motion of levitating bodies is substantiated. The initial mathematical model of the magnetic levitation control process, which has uncertain coefficients in differential equations and is nonlinear, is considered. To “hang” at a given (working) point of a levitating body, it is enough to create a mathematical control model in the vicinity of this point based on the linearization of the original mathematical model. A PID-based controller and feedback are added to the resulting model. The four controller coefficients are adjusted using special algorithms, taking into account the requirements for the robustness of the control system. Numerical experiments are carried out to analyze the behavior of the control system depending on the magnitude of the parameter uncertainty. Based on the analysis performed, a conclusion about the robustness of the developed control system for the object under consideration is made. The results of the study are presented in graphical form. The MATLAB system is used as a toolkit.

Keywords: linearization, magnetic levitation, mathematical modeling, parameters uncertainty, robustness, Earnshaw's theorem.

For citation:

Korobeynikov, Anatoliy G., and Anatoliy P. Nyrkov. “Mathematical modeling of robust automatic control system of magnetic levitation with uncertain parameters.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 867–875. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-867-875.

УДК 681.5.037.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А. Г. Коробейников^{1,2}, А. П. Ныркин³

¹ — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования являются разрабатываемые автоматизированные системы управления реальными процессами, которые должны удовлетворять различным требованиям, например, устойчивости к немоделируемой динамике (робастной устойчивости), а также соответствовать необходимому качеству переходных процессов, возникающих в случае внешних возмущений различной природы. В связи с этим появляется необходимость создания соответствующих математических моделей управления нестационарными объектами, модель которых включает неопределенные параметры. Рассмотрена задача разработки и исследования математической модели управления процессом электродинамической магнитной левитации, основной проблемой которого является динамическая устойчивость. Отмечается, что системы, использующие эффект магнитной левитации, находят широкое применение, например, в судостроении, элементах судовых механизмов, приборостроении, а также при транспортировке различных грузов. Обоснована актуальность работ, связанных с необходимостью разработки таких систем автоматического управления, которые могут подавлять возникающее колебательное движение левитирующих тел. Рассмотрена исходная математическая модель процесса управления магнитной левитации, имеющая неопределенные коэффициенты в дифференциальных уравнениях и являющаяся нелинейной. Для «зависания» в заданной (рабочей) точке левитирующего тела достаточно создать математическую модель управления в окрестности этой точки на базе линеаризации исходной математической модели. В полученную модель добавляются контроллер на базе ПИД-регулятора и обратная связь. Четыре коэффициента контроллера настраиваются при помощи специальных алгоритмов с учетом требований к робастности системы управления. Проведены численные эксперименты с целью анализа поведения системы управления в зависимости от величины неопределенности параметров. На основании выполненного анализа сделан вывод о робастности разработанной системы управления рассматриваемым объектом. Результаты исследования представлены в графической форме. В качестве инструментария использована система MATLAB.

Ключевые слова: линеаризация, магнитная левитация, математическое моделирование, неопределенные параметры, робастность, теорема Ирншоу.

Для цитирования:

Коробейников А. Г. Математическое моделирование робастной системы автоматического управления магнитной левитации с неопределенными параметрами / А. Г. Коробейников, А. П. Нырков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 867–875. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-867-875.

Введение (Introduction)

Один из самых существенных вопросов при проектировании любой системы автоматического управления (САУ) связан с устойчивостью. Нестабильная система не представляет практической ценности. Это объясняется тем, что любая САУ уязвима к помехам и шумам в реальной рабочей среде и эффект, вызванный этими сигналами, крайне отрицательно отражается на выходе неустойчивой системы [1].

Применение методов управления с обратной связью позволяет существенно уменьшить влияние неопределенностей, что сможет обеспечить требуемые характеристики САУ [2], [3]. Поэтому в настоящее время большой теоретический и практический интерес вызывают исследования, связанные с анализом зависимости устойчивости от степени неопределенности параметров математических моделей (ММ) конкретных САУ [2]–[8]. Это связано с тем, что в ходе реального процесса измерения практически всегда происходят с некоторой неопределенностью, что оказывает влияние на устойчивость процесса управления. Известна фундаментальная роль в изучении устойчивости механических структур теории демпфирования резонансных колебаний гироскопических систем [3] колебаний элементов судовых механизмов [4]. На судах для измерения давления в системах, где возможны кавитация, гидравлические удары или пики давления, применяются одобренные Российским морским регистром судоходства различные преобразователи давления с демпфером [5].

Эффект «парения», возникающий в ходе явления электродинамической магнитной левитации (ЭМЛ) проводящих объектов, нашел применение в магнитных и электрических подвесах, в бесконтактных магнитных и электромагнитных подшипниках [9]. Вращение вала в электромагнитных подшипниках происходит без физического контакта поверхностей друг с другом. В рабо-

тах [10], [11] представлены результаты анализа отказов на судах турбокомпрессоров (ТК) судовых дизель-генераторов. К основным элементам выходящих из строя ТК относятся подшипники качения и скольжения. Применение бесконтактных подшипников на судах позволяет не только исключить масляную систему смазки, которая оказывает существенное влияние на надежность работы ТК, но и повысить механический КПД и маневренность ТК.

Основной проблемой, на решение которой направлены усилия разработчиков САУ левитирующим телом (ЛТ), служит его динамическая неустойчивость. Данная проблема связана с физикой процесса ЛТ и объясняется при помощи теоремы Ирншоу [12], [13]. Согласно этой теореме, неустойчивость ЛТ возникает оттого, что магнитная сила, возникающая вблизи намагниченных тел (магнитов) или проводников с током, в одних случаях имеет одно направление — притяжение, а в других противоположное — отталкивание. Отсюда следует, что применяя только лишь статические электромагнитные поля, невозможно достичь эффекта ЭМЛ. Поэтому для решения данной задачи требуется использовать переменное электромагнитное поле для создания потенциальной ямы в окрестности проведения ЭМЛ. Это требование служит предпосылкой для разработки САУ ЭМЛ. Такие САУ применяют, например, в различных технических устройствах [6]–[9]. Основным направлением исследований в области разработки САУ ЭМЛ является перемещение (перевозка) различных грузов (например, в портовых складах) с целью создания эффективного и автоматического «парящего» транспорта. Исходя из этого, тематика данной публикации, направленная на разработку и исследование ММ САУ, позволяющих управлять динамикой ЛТ, является актуальной.

В предлагаемой работе рассмотрен анализ устойчивости (робастности) ММ ЛТ в зависимости от степени неопределенности ее параметров. В процессе исследования был использован инструментальный в виде специализированных программных средств (Toolbox), входящих в MATLAB, позволяющих решать задачи в различных предметных областях [14], [15].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обычно ММ управления ЛТ в переменном электромагнитном поле разрабатывают на базе теории управления нелинейными и неустойчивыми системами, что, в свою очередь, вызывает определенные трудности при компьютерном моделировании поведения и управления ЭМЛ. В работе рассматривается относительно быстрый физический процесс, имеющий период порядка миллисекунд (мс). За основу ММ управления этим процессом взята модель [16]:

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = AX + Bu = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2\frac{g}{x_{10}} & +2\frac{g}{x_{20}} & -\frac{k_D}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} u; \quad (1)$$

$$Y = CX = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ x_2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где R, L, m — сопротивление, индуктивность катушки, и масса ЛТ соответственно;

x_1, x_2, x_3 — ток, вертикальное расстояние от центра ЛТ до подложки и напряжение соответственно;

x_{10}, x_{20} — заданные координаты рабочей точки;

k_D, g — коэффициент демпфирования и ускорение свободного падения соответственно.

Анализ на наблюдаемость и управляемость (1), выполненный в работе [9], дал положительный результат. В данной работе неопределенности были внесены в параметры модели (1), что является ее основным отличием от модели в [16]. Что касается устойчивости модели (1) (без неопределенностей), то она устойчива, если устойчива матрица передаточных функций M :

$$M = \begin{bmatrix} GK(I + GK)^{-1} & G(I + KG)^{-1} \\ K(I + GK)^{-1} & -KG(I + KG)^{-1} \end{bmatrix},$$

где $G = C(sI - A)^{-1}B + D$ — передаточная функция системы (1);

K — передаточная функция искомого контроллера;

I — единичная матрица соответствующего размера.

При наличии неопределенностей вычисление матрицы M становится проблематичным и поэтому необходимо применять соответствующие методы. В реальном процессе неопределенности возникают, например, в ходе измерения положения ЛТ и задания величины тока в катушке индуктивности. Поэтому в данной работе для создания замкнутой системы с хорошим запасом устойчивости (робастности), был применен метод Гловера – Макфарлейна [17].

В работе представлены вычислительные эксперименты для двух случаев. В первом случае величина неопределенности задавалась 50 %, во втором — в десять раз меньше, т. е. 5 %. В системе MATLAB неопределенность можно задать, например, следующим образом:

%Расстояние от катушки до подложки 10 см

Uncertainty_H=5;% Неопределенность в пять процентов

H = ureal('H',10,'Percentage', Uncertainty_H).

Моделирование осуществлялось при следующих значениях параметров, взятых произвольно:

– с неопределенностями: $R = 10$; $L = 10$; $H = 10$;

– без неопределенностей: $g = 9,81$; $K_d = 7$; $K_m = 1$.

Координата рабочей точки задавалась неопределенной величиной: $z_p = 0,4H$. После вычисления параметров замкнутой системы с регулятором была создана ее Simulink-модель, при помощи которой можно сделать выводы о робастности созданной модели.

Результаты (Results)

В ходе проведения вычислительных экспериментов были получены следующие результаты. На рис. 1 приведены результаты расчета переходной функции разомкнутой системы с контроллером с неопределенностью 50 %.

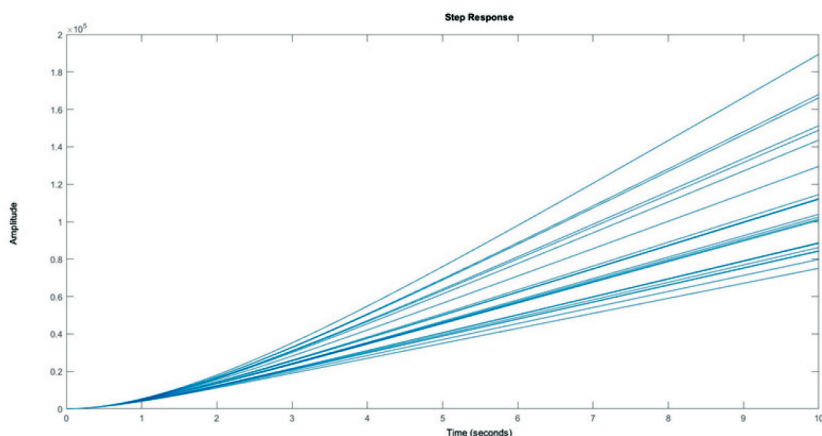
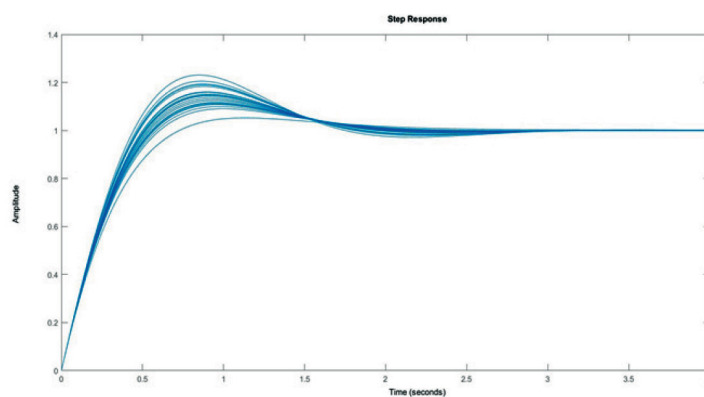


Рис. 1. График переходной функции разомкнутой системы с контроллером для первого вычислительного эксперимента

На рис. 2, а представлены результаты расчета переходной функции для замкнутой системы с ненастроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 50 %, на рис. 2, б — для замкнутой системы с настроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 50 %.

На рис. 3, а представлены результаты расчета переходной функции для замкнутой системы с ненастроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 5 %, на рис. 3, б — для замкнутой системы с настроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 5 %.

а)



б)

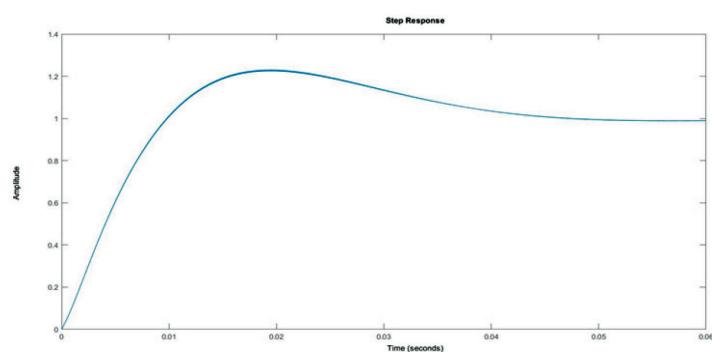
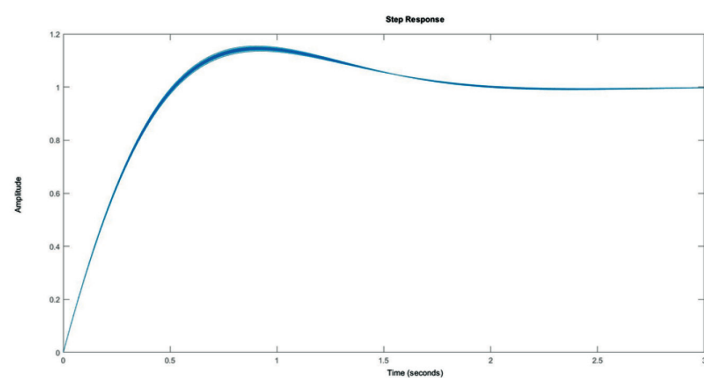


Рис. 2. График переходной функции замкнутой системы для первого вычислительного эксперимента:
а — с ненастроенным ПИД-регулятором; б — с настроенным ПИД-регулятором

а)



б)

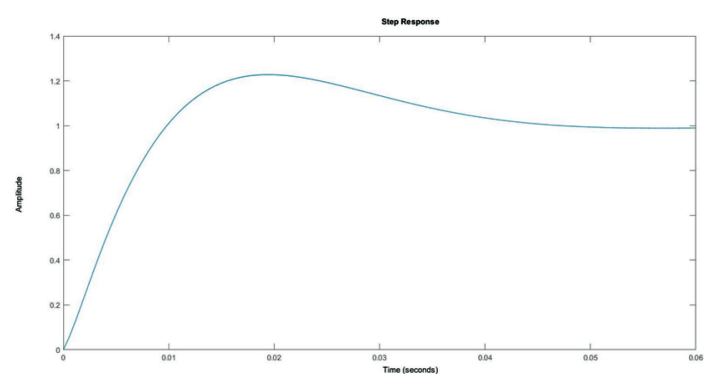


Рис. 3. График переходной функции замкнутой системы для второго вычислительного эксперимента:
а — с ненастроенным ПИД-регулятором; б — с настроенным ПИД-регулятором

На рис. 4 представлена Simulink-модель разработанной САУ ЛТ.

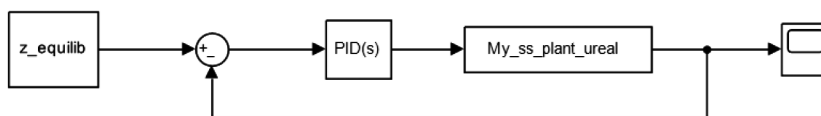


Рис. 4. Simulink-модель разработанной САУ ЛТ

На рис. 5 показан график переходного процесса при работе спроектированной САУ ЛТ.

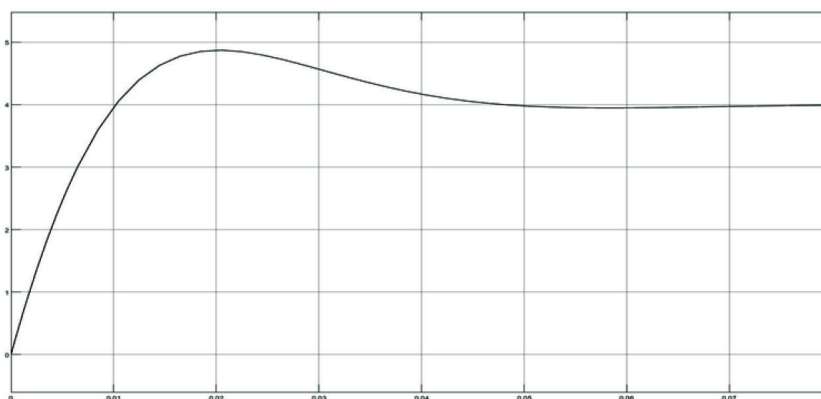


Рис. 5. График переходного процесса при работе предлагаемой САУ ЛТ

Графики переходного процесса, полученные в ходе имитационных экспериментов с Simulink-моделью САУ с неопределенностью параметров в диапазоне 10–45 %, имеют вид, аналогичный приведенному на рис. 1–5.

Обсуждение (Discussion)

Анализ полученных результатов, представленных в графической форме, позволяет сделать следующие выводы:

1. Рис. 1 в полном соответствии с теоремой Ирншоу свидетельствует о невозможности управления ЛТ САУ без обратной связи.
2. Выбранная структура САУ обладает робастными свойствами, что подтверждено выбором достаточно произвольных коэффициентов регулятора несмотря на то, что переходные характеристики, как видно из рис. 2, не очень хорошие. Тем не менее процесс сходится, становясь через 3 с стабильным. Если настроить коэффициенты регулятора методом Гловера – Макфарлейна, то процесс стабилизируется уже через 0,05 с (см. рис. 2).
3. Еще большая робастность представленной САУ проявляется в системе с меньшей неопределенностью (см. рис. 3), так как в данном случае наблюдается гораздо меньшее перерегулирование.
4. Сравнение рис. 2 и 3 является дополнительным аргументом в пользу робастности представленной САУ. Графики, приведенные на этих рисунках, очень похожи, хотя неопределенность системы на рис. 2 в десять раз выше, чем на рис. 3.
5. Представленная на рис. 4 Simulink-модель в достаточной мере позволяет проанализировать разработанную САУ ЛТ.
6. Рис. 5 показывает, что разработанная САУ через 0,06 с переводит ЛТ из неподвижного состояния в заданный устойчивый «коридор».

Заключение (Conclusion)

Полученные результаты свидетельствуют о робастности выбранной структуры САУ с отрицательной обратной связью. Выбор номинальных значений параметров модели не оказывает

существенного влияния на конечный результат. Это связано с линейностью модели (1). Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности применения ПИД-регулятора в данной задаче. Следовательно, применение других типов контроллеров, требующих больших вычислительных ресурсов, можно минимизировать.

Исходя из рис. 2 и 3, можно утверждать, что неопределенность параметров системы (1), в силу робастности ее структуры, достаточно слабо влияет на устойчивость всей системы вплоть до значения неопределенности, равного 50 %.

Планирование дальнейших исследований должно базироваться на работе с использованием нелинейных моделей. Это требование обусловлено нелинейностью магнитных устройств, например, соленоидов.

Благодарности (Acknowledgements)

Работа выполнена в рамках проекта «Многоуровневое управление сложными техническими системами» НИР 12441 (госзадание 2019–0898).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А. А. Синтез робастного управления параметрически неопределенными линейными системами для подавления случайных внешних возмущений / А. А. Белов, О. Г. Андрианова // Автоматика и телемеханика. — 2020. — № 4. — С. 94–109. DOI: 10.31857/S0005231020040078.
2. Чертков А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MatLab / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 164–171.
3. Черников С. А. Демпфирование резонансных колебаний гироскопических систем динамическим гасителем переменной структуры / С. А. Черников, Самер-Салек // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2006. — № 4 (65). — С. 111–125.
4. Андрианов Е. Н. Модальный метод параметрического демпфирования элементов судовых механизмов / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 56а–66.
5. Преобразователи давления Danfoss [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://jetpumps.ru/preobrazovateli-davleniya-danfoss> (дата обращения: 18.06.2023).
6. Vo A. T. A Novel Fixed-Time Control Algorithm for Trajectory Tracking Control of Uncertain Magnetic Levitation Systems / A. T. Vo, T. N. Truong, H. J. Kang // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 47698–47712. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068140.
7. Mirica K. A. Magnetic Levitation in the Analysis of Foods and Water / K. A. Mirica, S. T. Phillips, C. R. Mace, G. M. Whitesides // Journal of agricultural and food chemistry. — 2010. — Vol. 58. — Is. 11. — Pp. 6565–6569. DOI: 10.1021/jf100377n.
8. Qadir Z. A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport / Z. Qadir, A. Munir, T. Ashfaq, H. S. Munawar, M. A. Khan, K. Le // Cleaner Engineering and Technology. — 2021. — Vol. 4. — Pp. 100217. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100217.
9. Повный А. Как устроены и работают бесконтактные магнитные подшипники, их достоинства и недостатки [Электронный ресурс] / А. Повный. — Режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1891-beskontaktnye-magnitnye-podshipniki.html> (дата обращения: 18.06.2023).
10. Николаев Н. И. Повышение эффективности и надежности турбокомпрессоров судовых двигателей в эксплуатации: монография / Н. И. Николаев. — СПб.: Судостроение, 2009. — 230 с.
11. Николаев Н. И. Современное состояние и техническая эксплуатация турбонаддувочных агрегатов: монография / Н. И. Николаев, В. А. Савченко. — СПб.: Судостроение, 2005. — 114 с.
12. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. — М.: Издательство «МИР», 1977. — Т. 5: Электричество и магнетизм. — 300 с.
13. Abanov A. Around a theorem of F. Dyson and A. Lenard: Energy equilibria for point charge distributions in classical electrostatics / A. Abanov, N. Hayford, D. Khavinson, R. Teodorescu // Expositiones Mathematicae. — 2021. — Vol. 39. — Is. 2. — Pp. 182–196. DOI: 10.1016/j.exmath.2021.03.003.

14. Korobeynikov A. G. Calculation of regularization parameter in the problem of blur removal in digital image / A. G. Korobeynikov, A. Y. Grishentsev, E. N. Velichko, C. C. Korikov, S. A. Aleksanin, M. E. Fedosovskii, I. B. Bondarenko // *Optical Memory and Neural Networks*. — 2016. — Vol. 25. — Pp. 184–191. DOI: 10.3103/S1060992X16030036.

15. Гришенцев А. Ю. Понижение размерности пространства при корреляции и свертке цифровых сигналов / А. Ю. Гришенцев, А. Г. Коробейников // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2016. — Т. 59. — № 3. — С. 211–218. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-211-218.

16. Коробейников А. Г. Проектирование математической модели системы автоматического управления магнитной левитации / А. Г. Коробейников // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. — 2021. — № 12–2 (63). — С. 15–26. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-12-2-15-26.

17. McFarlane D. A loop-shaping design procedure using H/∞ synthesis / D. McFarlane, K. Glover // *IEEE transactions on automatic control*. — 1992. — Vol. 37. — Is. 6. — Pp. 759–769. DOI: 10.1109/9.256330.

REFERENCES

1. Belov, A. A., and O. G. Andrianova. “Robust control design for suppressing random exogenous disturbances in parametrically uncertain linear systems.” *Automation and Remote Control* 81.4 (2020): 649–661.

2. Chertkov, A. A., D. S. Tormashev, and S. V. Saburov. “Dynamic systems parametric arrange by means PID tuner in MatLab.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 164–171.

3. Chernikov, S. A., and Samer-Salek. “Damping resonant vibrations of gyroscopic systems by dynamic damper of variable structure.” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering* 4(65) (2006): 111–125.

4. Andrianov, E. N., V. V. Sakharov, and A. G. Taranin. “Modally damped parametric method for ship constructions.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2012): 56a-66.

5. Preobrazovateli davleniya Danfoss. Web. 18 Jun. 2023 <<https://jetpumps.ru/preobrazovateli-davleniya-danfoss/>>.

6. Vo, Anh Tuan, Thanh Nguyen Truong, and Hee-Jun Kang. “A novel fixed-time control algorithm for trajectory tracking control of uncertain magnetic levitation systems.” *IEEE Access* 9 (2021): 47698–47712. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068140.

7. Mirica, Katherine A., Scott T. Phillips, Charles R. Mace, and George M. Whitesides. “Magnetic levitation in the analysis of foods and water.” *Journal of agricultural and food chemistry* 58.11 (2010): 6565–6569. DOI: 10.1021/jf100377n.

8. Qadir, Zakria, Arslan Munir, Tehreem Ashfaq, Hafiz Suliman Munawar, Muazzam A. Khan, and Khoa Le. “A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport.” *Cleaner Engineering and Technology* 4 (2021): 100217. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100217.

9. Povnyi, A. “Kak ustroeny i rabotayut beskontaktnye magnitnye podshipniki, ikh dostoinstva i nedostatki.” Web. 18 Jun. 2023 <<https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1891-beskontaktnye-magnitnye-podshipniki.html>>.

10. Nikolaev, N. I. *Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti turbokompressorov sudovykh dvigatelei v ekspluatatsii*. SPb.: Sudostroenie, 2009.

11. Nikolaev, N. I., and V. A. Savchenko. *Sovremennoe sostoyanie i tekhnicheskaya ekspluatatsiya turbonaduvocnykh agregatov*. SPb.: Sudostroenie, 2005.

12. Feynman, R., R. Layton, and M. Sands. *Feynman Lectures on Physics. Vol. 2 — Mainly Electromagnetism and Matter*. Addison Wesle, 1977.

13. Abanov, Artem, Nathan Hayford, Dima Khavinson, and Razvan Teodorescu. “Around a theorem of F. Dyson and A. Lenard: Energy equilibria for point charge distributions in classical electrostatics.” *Expositiones Mathematicae* 39.2 (2021): 182–196. DOI: 10.1016/j.exmath.2021.03.003.

14. Korobeynikov, A. G., A. Y. Grishentsev, E. N. Velichko, C. C. Korikov, S. A. Aleksanin, M. E. Fedosovskii, and I. B. Bondarenko. “Calculation of regularization parameter in the problem of blur removal in digital image.” *Optical Memory and Neural Networks* 25 (2016): 184–191. DOI: 10.3103/S1060992X16030036.

15. Grishentsev, A. Yu., and A. G. Korobeynikov. “On reduction of space dimension at digital signals correlation and convolution.” *Journal of Instrument Engineering* 59.3 (2016): 211–218. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-211-218.

16. Korobeynikov, A. G. "Designing a mathematical model of a magnetic levitation automatic control system." *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* 12–2(63) (2021): 15–26. DOI: 10.24412/2500–1000–2021–12–2–15–26.

17. McFarlane, Duncan, and Keith Glover. "A loop-shaping design procedure using H_{∞} synthesis." *IEEE transactions on automatic control* 37.6 (1992): 759–769. DOI: 10.1109/9.256330.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коробейников Анатолий Григорьевич —
доктор технических наук, профессор
Университет ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация,
Кронверкский проспект, д. 49, лит. А
СПбФ ИЗМИРАН
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Университетская наб, д. 5, лит. Б
e-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
Ныркв Анатолий Павлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf.koib@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korobeynikov, Anatoliy G. —
Dr. of Technical Sciences, professor
ITMO University
49/A Kronverkskii Ave., St. Petersburg, 197101,
Russian Federation
SPbF IZMIRAN
5/B Universitetskaya Embankment, St. Petersburg,
199034, Russian Federation
e-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
Nyrkov, Anatoliy P. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf.koib@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 31 июля 2023 г.
Received: July 31, 2023.*

CALCULATING A COLLISION AVOIDANCE MANEUVER FOR TWO UNMANNED SHIPS BY MINIMIZING A COST FUNCTION IN MATLAB

O. Y. Tripolets

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

An approach to the problem of collision avoidance of two unmanned vessels in certain area based on cost function minimization is presented in the paper. A script written in the MATLAB computational environment that calculates the optimal maneuver to prevent a collision is described. The cost function in this study is defined as the square of the difference between the safe distance and the Closest Point of Approach, and in order to find the optimal maneuver, it needs to be minimized, for which the fmincon (a MATLAB optimization function) is used in this code. The calculation of collision avoidance maneuvers is made “from the perspective” of the VTS: it’s optimized for two vessels and allows the vessels to pass each other at a specified distance. The script, taking as input a matrix with data on pairs of approaching vessels (their x and y coordinates, speeds, and courses), by minimizing the cost function, calculates the optimal change in speeds and/or coordinates for two vessels, allowing them to pass each other at a safe distance. To verify the functionality of the script, a successful simulation is carried out in MATLAB. Several examples of its operation are given. These are situations where the closest point of approach (CPA) is greater than safe one; situations where the CPA is less than safe distance, but the time to CPA is greater than safe time; and situations of dangerous convergence. The calculation results are illustrated with MATLAB graphs. The code of the script described in this paper can be further refined to work in conjunction with other algorithms, and it can also be used to create training datasets for training neural networks to predict safe maneuvers to prevent collisions of unmanned vessels at sea. In this study, the influence of wind and current is not considered, and the COLREGs-72 is not also taken in consideration. Vessels can maneuver both to port and starboard, as well as reduce speed regardless of the type of approach situation.

Keywords: CPA, cost function minimization, vessels motion modelling, collision avoidance, unmanned surface vessel, MATLAB, neural networks.

For citation:

Tripolets, Oleg Y. “Calculating a collision avoidance maneuver for two unmanned ships by minimizing a cost function in MATLAB.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 876–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884.

УДК 656.61.052

РАСЧЕТ МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ ДВУХ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИИ СТОИМОСТИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ MATLAB

О. Ю. Триполец

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

В данной работе представлен подход к решению проблемы расхождения двух безэкипажных судов в определенной акватории на основе минимизации функции стоимости, а также описан скрипт, написанный в компьютерной среде MATLAB, позволяющий вычислить оптимальный маневр для предотвращения столкновения. Функция стоимости в данной работе определена как квадрат разности между безопасной дистанцией и дистанцией опасного сближения, и в целях нахождения оптимального маневра должна быть минимизирована, для чего в данном коде используется fmincon (функция оптимизации MATLAB). Расчет маневров расхождения производится с учетом СУДС сразу для двух судов, является оптимальным и позволяет судам разойтись на заданной безопасной дистанции. Скрипт, получая на вход

матрицу, содержащую данные о парах сближающихся судов (их координатами по осям X и Y , скоростями и курсами), путем минимизации функции стоимости (*Cost Function*), вычисляет оптимальное изменение скоростей и / или курсов для двух судов, позволяющее им разойтись на безопасной дистанции. Для проверки работоспособности скрипта была проведена успешная симуляция в компьютерной среде MATLAB. Приведены несколько примеров его работы: ситуации, где дистанция кратчайшего сближения была больше безопасной; ситуации, где дистанция кратчайшего сближения была меньше безопасной, но время до столкновения — больше безопасного; и ситуации опасного сближения. Результаты расчетов показаны на графиках в MATLAB. Код описываемого в данной работе скрипта может быть усовершенствован для совместной работы с другими алгоритмами, а также может быть использован для создания обучающих выборок для обучения нейронных сетей прогнозированию безопасных маневров для предотвращения столкновений безэкипажных судов в море. В данной работе не учитывается влияние ветра и течения, а также отсутствует учет МППСС-72, и суда могут маневрировать как влево, так и вправо, а также снижать скорость вне зависимости от вида ситуации сближения.

Ключевые слова: дистанция кратчайшего сближения, минимизация функции стоимости, моделирование движения судов, предотвращение столкновений, безэкипажное судно, MATLAB, нейронные сети.

Для цитирования:

Триполец О. Ю. Расчет маневра расхождения двух безэкипажных судов путем минимизации функции стоимости в компьютерной среде MATLAB / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 876–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884.

Введение (Introduction)

В настоящее время исследования, посвященные эксплуатации безэкипажных судов (БЭС), во многом мотивированы стремлением к оптимизации перевозок грузов морем и повышением их стабильности безопасности. Выполненный в работе [1] анализ морских аварий показал, что большинство из них происходят по вине человека. Введение высоких уровней автономности позволит уменьшить количество аварий на морском транспорте, снизить затраты на топливо, операционные расходы (включая экипаж), а также снизить риски морских перевозок за счет уменьшения частоты и последствий человеческих ошибок. Однако для полноценного перехода к эксплуатации БЭС ученым еще предстоит решить ряд проблем, одной из которых является проблема безопасного расхождения БЭС в море.

В настоящее время существует множество подходов к решению этой проблемы, новейшие из которых рассмотрены в [2], [3]. Авторы [4] используют методы оптимизации и минимизации функции стоимости для обхода судном статических и динамических препятствий и нахождения безопасного маршрута следования. Автор статьи [5], где нейронные сети (НС) применяются не только для расхождения с другими судами, но и для идентификации всех препятствий, встречающихся на пути судна, предлагает основанное на теории нейронных сетей с применением глубокого обучения решение задачи интегрирования всех датчиков, обеспечивающих возможность самостоятельной навигации судна. Данный подход был успешно испытан на 10-метровом исследовательском судне на дистанции 11 миль в заливе Чесапик (США). Авторы [6] для решения задачи безэкипажного расхождения судов взяли за основу нейросетевую архитектуру GoogleNet.

Использование методов глубокого обучения и долгой краткосрочной памяти в комбинации с эвристическим планированием позволило создать НС, которая успешно справляется с задачей расхождения с тремя и четырьмя судами в компьютерной симуляции (без учета МППСС-72). Эволюционные НС, построенные с помощью кодирования на ассемблере с эволюционирующими операциями (Assembler Encoding with Evolvable Operations) и кооперативные коэволюционные НС (Cooperative Co-Evolutionary Neural Networks), использованные в работе [7], успешно справились с выполнением 170 тренировочных сценариев расхождения судов в программной среде, 40 из которых спроектировал судоводитель, 70 — дилетант и 60 — программа. При этом судно-оператор могло предпринимать любые маневры для предотвращения столкновений. В статье [8] авторам удалось провести успешную симуляцию подхода к решению проблемы расхождения БЭС в программной среде MATLAB, используя для этого нейронные сети и глубокое обучение с подкреплением.

дующим образом: дистанция между двумя судами в момент времени t вычисляется по следующей формуле:

$$D(t) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{[x_2 - x_1 + (v_2 \cos K_2 - v_1 \cos K_1)t]^2 + [y_2 - y_1 + (v_2 \sin K_2 - v_1 \sin K_1)t]^2}. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что для правильного выполнения расчетов и отображения курсов судов в рабочей среде MATLAB курсы судов необходимо вводить через « $\pi/2$ — курс». Это преобразование координат связано с разницей в ориентации осей и определении углов в математической и навигационных системах (используя выражение « $\pi/2$ — курс», переводим «навигационный» угол в «математический»). Приравняв производную по времени от дистанции между судами нулю, получим уравнение, из которого можно найти такое значение времени, при котором данное равенство будет иметь место и которое в данном случае будет являться временем ТСПА (Time to Closest Point of Approach) сближения судов на кратчайшую дистанцию. Определив таким способом значение ТСПА и подставив его в исходное выражение (1), найдем значение СПА [9]. Для нахождения минимума в MATLAB использовалась функция `fminbnd`, для поиска СПА использовался трехчасовой промежуток.

Зная СПА и ТСПА для всех пар судов из матрицы X , можно приступить к вычислению маневров, необходимых для предотвращения столкновений. В описываемом скрипте были установлены следующие условия:

- если СПА больше безопасной дистанции (задается пользователем), расчет маневра расхождения не производится;
- если СПА меньше безопасной дистанции, но ТСПА больше опасного ТСПА (задается пользователем), то расчет маневра расхождения не производится, а данная пара судов помечается особым образом для привлечения внимания пользователя;
- если СПА меньше безопасной дистанции и ТСПА меньше опасного ТСПА, то выполняется расчет маневра расхождения судов.

Расчет маневра для безопасного расхождения двух судов. Созданный в рамках данного подхода скрипт позволяет на основе матрицы X , содержащей данные о парах судов, формировать матрицу $X_adjusted$, содержащую данные о парах судов, среди которых нет опасно сближающихся.

В начале скрипта данные о парах судов из матрицы X копируются в матрицу $X_adjusted$. Кроме того, задаются такие параметры, как SD (Safety Distance — безопасная дистанция, равная в данной работе одной морской миле), D_TCPA (D — Dangerous — опасное ТСПА; в данной работе составляет полчаса).

Далее код скрипта начинает выполнение цикла: для каждой пары судов производится расчет СПА и ТСПА согласно формуле (1). Если $СПА > SD$, т. е. опасности столкновения между судами в паре не существует, данные соответствующих судов не меняются в $X_adjusted$. Если $СПА < SD$, но $ТСПА > D_TCPA$, т. е. опасность столкновения существует, но позже, чем через 30 мин, расчет маневра также не производится и данные о соответствующей паре останутся в $X_adjusted$ без изменения, однако пользователь увидит сообщение о том, что опасность столкновения существует, при этом значение ТСПА также будет выведено на экран. Если $СПА < SD$ и $ТСПА \leq D_TCPA$, т. е. в данной паре судов существует непосредственная опасность столкновения, то начинается расчет маневра для расхождения этих судов на безопасной дистанции.

Поиск оптимального изменения скорости и / или курса ведется при помощи Cost Function (функции стоимости, или целевой функции). Эта функция в данной работе определена как квадрат разности между SD и вычисленной СПА и в целях нахождения оптимального маневра должна быть минимизирована, для чего в данном коде используется функция `fmincon` (функция оптимизации в MATLAB). Функция `fmincon` пытается найти такой вектор *actions* (вектор маневров, состоящий из изменений курсов и скоростей обоих судов), при котором Cost Function минимальна. Каждый раз, когда `fmincon` предлагает новый вектор *actions*, Cost Function вычисляется снова, используя эти маневры. Если значение функции стоимости меньше для нового вектора *actions*, то этот вектор

считается более оптимальным и сохраняется. Этот процесс продолжается, пока `fmincon` не найдет вектор `actions`, который не может быть улучшен дальнейшими изменениями или до тех пор, пока не будет достигнута максимальная количество итераций. Описанные ранее действия выполняются в коде следующим образом:

```
CostFunction = @(actions) (SD - CPA(x1, y1, speed1, course1, x2, y2, speed2, course2, actions)).^2;
```

```
OptimalActions = fmincon(CostFunction, InitialActions, [], [], [], [], lb, ub, [], options);
```

`InitialActions` (изначальный маневр) является нулевым вектором; `lb` (lower bound) и `ub` (upper bound) используются для установки ограничений маневрирования для судов. В данной работе было определено следующее: суда не могут изменять свой курс более, чем на 60 градусов, возможно только снижение скорости (ускорение запрещено), минимальная скорость не может быть ниже 0 уз. В данной работе оба судна могут маневрировать путем изменения курса и скорости. Учет МППСС в данном скрипте не предусмотрен. Возможно маневрирование курсом как вправо, так и влево.

Вычисленные оптимальные действия (`OptimalActions`) позволяют изменить изначальную CPA до значений, равных или превосходящих SD, и затем в коде используются для обновления изначальных скоростей и / или курсов пар судов. Эти данные переносятся в `X_adjusted`, таким образом формируя матрицу с парами судов, расходящихся на безопасных дистанциях. Информация о факте выполнения расчетов для пары судов выводится на экран: пользователю видна изначальная CPA, необходимая для безопасного расхождения изменения скоростей и / или курсов для судов *A* и *B*, а также CPA, рассчитанная после «выполнения» судами маневра.

Результаты (Results)

Симуляция работы скрипта в MATLAB. Проверим работоспособность ранее описанного скрипта. Создадим матрицу *X*, содержащую данные о пятистах парах случайных судов. Предположим, что данный скрипт используется в реальных условиях в СУДС. Данные о судах СУДС получает заблаговременно, чтобы иметь возможность координировать их безопасное маневрирование. Так как матрица *X* создается путем генерации случайных значений в определенных пределах, необходимо убедиться, что суда во всех парах находятся на достаточном изначальном расстоянии друг от друга. Согласно некоторым толкованиям положений МППСС-72, «Сближение двух судов в открытом море на расстоянии около 2 миль обычно считается чрезмерным» [10, с. 169–170]. Убедимся, что в матрице *X* все суда изначально находятся как минимум в трех милях друг от друга, чтобы у них была возможность выполнить маневр, а также чтобы исключить ситуацию, в которой суда изначально при случайной генерации событий находятся «друг на друге». Для этого в компьютерной среде MATLAB был написан скрипт, рассчитывающий изначальные дистанции между судами в парах из матрицы *X*. Координаты пар, в которых суда находятся на расстоянии менее 3 миль друг от друга, изменяются в данном скрипте случайным образом до тех пор, пока дистанция между ними не достигнет трех миль или более. Теперь матрица *X*, «обработанная» таким скриптом, не содержит судов, находящихся на недостаточном расстоянии друг от друга так же, как и в действительности СУДС обнаруживает сближение судов заблаговременно, используя данные с АИС и радаров.

Для построения графиков и моделирования движения пар судов до и после маневра использовалась программа из работы [11], позволяющая осуществлять визуальную презентацию движения двух судов и наблюдать наличие или отсутствие опасности столкновения, т. е. производить симуляцию работы алгоритма расхождения и проверку его эффективности. Некоторые из 500 пар судов в созданной матрице *X* имеют опасность столкновения и изначально расположены на расстоянии трех миль и более друг от друга.

Используем описанный в данной работе скрипт для создания `X_adjusted`. Рассмотрим конкретные пары судов для демонстрации работы скрипта.

Пара судов № 1 (рис. 1). (Здесь и далее на рисунках представлены скриншоты графиков, построенных в программе MATLAB): [–12; 1; 16; 5,7; –2; 2; 10; 4,6] (здесь и далее в квадратных скобках приведены столбцы матрицы *X*, соответствующие определенным парам судов). CPA = 9,87 мили,

ТСРА = 8,2 мин. Изначальная дистанция 10 миль. Пользователю не выводятся данные о данной паре, так как опасность столкновения отсутствует ($CPA > SD$).

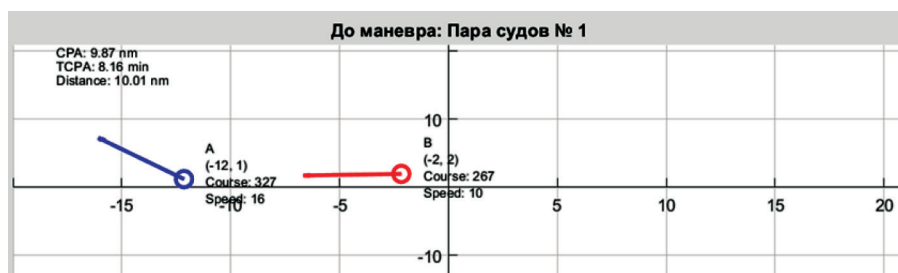


Рис. 1. Пара № 1: опасность столкновения отсутствует

Пара судов № 4 (рис. 2): $[-9; -15; 8; 5,7; -13; -6; 11; 2,6]$. CPA = 0,69 мили, ТСРА = 31 мин. Изначальная дистанция 9,53 мили. Опасность столкновения существует ($CPA < SD$), однако до ситуации опасного сближения более чем полчаса. Маневр не рассчитывается. Пользователю выводятся данные о номере этой пары, ее CPA и ТСРА.

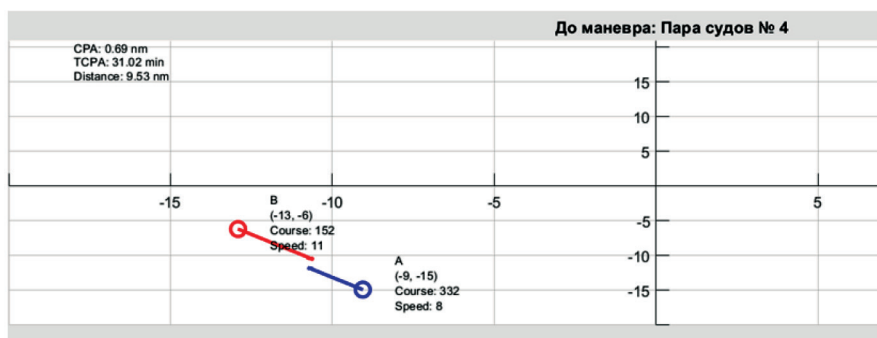


Рис. 2. Пара № 2: опасность столкновения существует позднее заданного ТСРА

Пара судов № 201 (рис. 3): $[16; 1; 3; 2,7; 14; 5; 16; 2,7]$. CPA = 0,09 мили, ТСРА = 20,6 мин. Изначальная дистанция 4,36 мили. $CPA < SD$ и $ТСРА < D_ТСРА$. Для данной пары рассчитывается маневр оптимального расхождения. Пользователю выводится следующая информация:

Пара судов № 201: Изначальная CPA = 0,09 мили;
Судно A: изм. курса = $-0,33$ rad; изм. скорости 0,16 уз.
Судно B: изм. курса = 0,11 rad; изм. скорости 0,00 уз.
CPA после маневра = 1.00 мили.

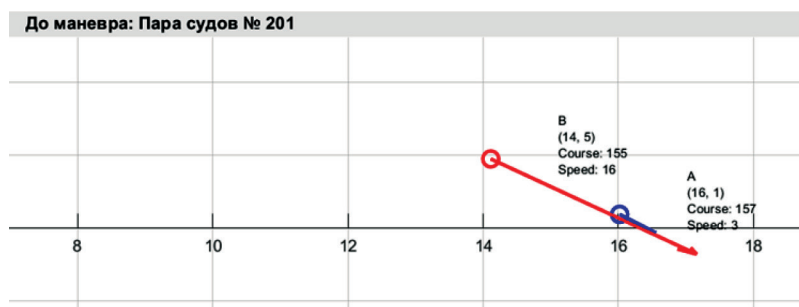


Рис. 3. Пара № 201 до маневра: опасность столкновения существует

После маневрирования, в соответствии с данным скриптом, получаем измененные значения скоростей и курсов для пары № 201 в матрице $X_adjusted$: $[16; 1; 2.837; 2.408; 14; 5; 16; 2.819]$ (рис. 4).

Курс судна *A* изменился от 157° до 138° , курс судна *B* — от 155° до 162° (суда сманеврировали в разные стороны). Скорость судна *A* была также изменена (незначительно) с 3 до 2,8 уз. CPA теперь равна одной миле, ТСРА — 19,5 мин. Как видно из данного примера, ситуации опасного сближения для данной пары более не существует и CPA = SD.

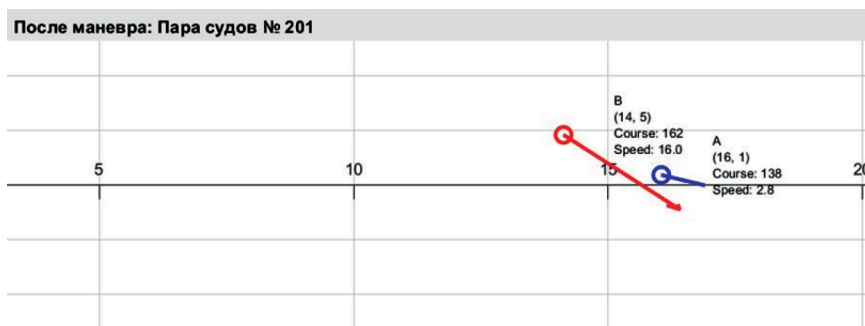


Рис. 4. Пара № 201 после маневра: опасность столкновения отсутствует

Так как данный скрипт создает матрицу с измененными скоростями и / или курсами для опасно сближающихся судов (что приводит к их расхождению на безопасной дистанции), результаты его работы могут быть использованы для обучения нейронных сетей, которые затем могут быть использованы для быстрого прогнозирования необходимых изменений в скорости и курсе для предотвращения столкновений судов.

Заключение (Conclusion)

В работе описан подход к решению проблемы расхождения безэкипажных судов, основанный на геометрической интерпретации движения двух судов и минимизации функции стоимости. Его особенностью является то, что расчет маневра производится сразу для двух судов, находящихся в определенной акватории (например, зоне ответственности СУДС). В рамках данного подхода написан скрипт, позволяющий обнаружить пары опасно сближающихся судов и при необходимости рассчитать оптимальный маневр предотвращения столкновения для обоих судов. Результатом работы скрипта является преобразование матрицы, содержащей данные об опасно сближающихся судах, в матрицу, состоящую из пар судов с теми же координатами, но измененными скоростями и / или курсами так, что опасности столкновения для них больше не существует. Работоспособность скрипта была проверена и подтверждена в симуляции в программной среде MATLAB.

В работе не учитывается влияние ветра и течения, а также отсутствует учет МППСС-72 и времени, необходимого на изменение курса / скорости. Оба судна могут маневрировать как влево, так и вправо и при необходимости сбавлять скорость, что будет оптимальным решением задачи предотвращения столкновения в конкретном случае. В дальнейшем планируется усовершенствовать скрипт таким образом, чтобы оптимальный маневр рассчитывался для трех и более судов, находящихся в зоне действия СУДС. Поскольку вычисления CPA могут осуществляться медленнее, чем использование нейронных сетей [12], планируется, что в дальнейшем скрипт будет использовать НС, обученную нахождению дистанции кратчайшего сближения между двумя судами.

Предлагаемый в работе скрипт написан с использованием циклов, т. е. он обрабатывает каждую пару судов по очереди, что может быть проблематично при большом количестве судов, поскольку время выполнения кода может значительно увеличиться. В связи с этим планируется внедрить в данный код использование векторизованных операций вместо циклов для обработки нескольких пар судов одновременно, что позволит ускорить быстрое действие. Применение разработанного в данной работе скрипта позволит создать обучающую выборку для нейронной сети, прогнозирующей необходимые изменения скоростей и / или курсов пар судов для их безопасного расхождения, что позволит СУДС обрабатывать большие массивы данных с большей эффективностью.

Цель работы достигнута: описан подход к решению проблемы расхождения двух безэкипажных судов в определенной акватории.

Задачи работы выполнены: создан скрипт, позволяющий рассчитывать маневры расхождения на безопасной дистанции для двух опасно сближающихся судов в определенной акватории; его работоспособность и эффективность доказана путем симуляции и построении графиков в MATLAB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chauvin C. Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS / C. Chauvin, S. Lardjane, G. Morel, J. P. Clostermann, B. Langard // *Accident Analysis & Prevention*. — 2013. — Vol. 59. — Pp. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
2. Zhang X. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey / X. Zhang, C. Wang, L. Jiang, L. An, R. Yang // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 235. — Pp. 109380. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109380.
3. Huang Y. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art / Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R. R. Negenborn, P. H. A. J. M. Van Gelder // *Safety science*. — 2020. — Vol. 121. — Pp. 451–473. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.
4. Bertaska I. R. Experimental evaluation of automatically-generated behaviors for USV operations / I. R. Bertaska, B. Shah, K. von Ellenrieder, P. Švec, W. Klinger, A. J. Sinisterra, M. Dhanak, S. K. Gupta // *Ocean Engineering*. — 2015. — Vol. 106. — Pp. 496–514. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.002.
5. Wright R. G. Intelligent autonomous ship navigation using multi-sensor modalities / R. G. Wright // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2019. — Vol. 13. — No. 3. — Pp. 503–510. DOI: 10.12716/1001.13.03.03.
6. Li Y. Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel / Y. Li, J. Zheng // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. — 2021. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 511–520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
7. Praczyk T. Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle / T. Praczyk // *Neurocomputing*. — 2015. — Vol. 149. — Pp. 559–572. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.08.018.
8. Wang C. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments / C. Wang, X. Zhang, L. Cong, J. Li, J. Zhang // *Evolving Systems*. — 2019. — Vol. 10. — Is. 4. — Pp. 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
9. Букатый В. М. Точностные характеристики метода непосредственного определения дистанции кратчайшего сближения судов по информации от АИС / В. М. Букатый, С. Ю. Морозова // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2012. — № 2 (68). — С. 9–15.
10. Коккрофт А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Д. Н. Ламейер; Пер. с англ. Н. Я. Брызгина и Н. Т. Шайхутдинова; под. ред. Н. Я. Брызгина. — М.: Транспорт, 1981. — 280 с.
11. Триполец О. Ю. Моделирование маневра расхождения двух судов в компьютерной среде MATLAB / О. Ю. Триполец // *Математические модели техники, технологий и экономики: материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 08 июня 2023 г.* — СПб.: СПбГЛТУ, 2023. — С. 16–21.
12. Триполец О. Ю. Обучение нейронной сети вычислению дистанции кратчайшего сближения между судами / О. Ю. Триполец // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 713–721. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-713-721.

REFERENCES

1. Chauvin, Christine, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, and Benoît Langard. “Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS.” *Accident Analysis & Prevention* 59 (2013): 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
2. Zhang, Xinyu, Chengbo Wang, Lingling Jiang, Lanxuan An, and Rui Yang. “Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey.” *Ocean Engineering* 235 (2021): 109380. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109380.
3. Huang, Yamin, Linying Chen, Pengfei Chen, Rudy R. Negenborn, and P.H.A.J.M. van Gelder. “Ship collision avoidance methods: State-of-the-art.” *Safety science* 121 (2020): 451–473. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.

4. Bertaska, Ivan R., Brual Shah, Karl von Ellenrieder, Petr Švec, Wilhelm Klinger, Armando J. Sinisterra, Manhar Dhanak, and Satyandra K. Gupta. "Experimental evaluation of automatically-generated behaviors for USV operations." *Ocean Engineering* 106 (2015): 496–514. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.002.
5. Wright, R. Glenn. "Intelligent autonomous ship navigation using multi-sensor modalities." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 13.3 (2019): 503–510. DOI: 10.12716/1001.13.03.03.
6. Li, Yun, and Jian Zheng. "Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 235.2 (2021): 511–520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
7. Praczyk, Tomasz. "Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle." *Neurocomputing* 149 (2015): 559–572. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.08.018.
8. Wang, Chengbo, Xinyu Zhang, Longze Cong, Junjie Li, and Jiawei Zhang. "Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments." *Evolving Systems* 10.4 (2019): 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
9. Bukaty, V. M., and S. Y. Morozova. "Direct determination of the close-quarter distance on the basis of importation received from automatic identification systems." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(68) (2012): 9–15.
10. Cockcroft, A. N., and J.N.F. Lameijer. *A Guide to the Collision Avoidance Rules*. 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2012.
11. Tripolets, O. Yu. "Modelirovanie manevra raskhozhdeniya dvukh sudov v komp'yuternoi srede MATLAB." *Matematicheskie modeli tekhniki, tekhnologii i ekonomiki: materialy Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: SPbGLTU, 2023. 16–21.
12. Tripolets, Oleg Y. "Training a neural network to calculate the closest point of approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 713–721. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-713-721.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Триполец Олег Юрьевич — аспирант
Научный руководитель:
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: tripolets.97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tripolets, Oleg Y. — Postgraduate
Supervisor:
Deryabin, Viktor 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: tripolets.97@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 июня 2023 г.
Received: June 25, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892

DETERMINATION OF THE OPTIMAL PERIOD FOR COMPUTATIONS CONTROL IN COMPLEXES OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS PROGRAMS

K. P. Goloskokov, V. V. Korotkov, A. A. Astapkovich

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

The purpose of the study is to determine the optimal period for monitoring calculations in complex software complexes of automated control systems. To achieve this goal, it is necessary to solve such problems as the analysis of periodic control systems, which boils down to determining the performance costs of computing systems for control, as well as ensuring a minimum of these costs. Theoretical foundations and descriptions of the process of evaluating the effectiveness of the automated control systems functioning are given. A rationale for the method of determining the optimal period for monitoring calculations in software complexes of the automated control systems is provided in the paper. An analytical study of control systems is carried out. The difference between the considered problem setting and the existing ones lies in the fact that the accuracy of error detection by the periodic control system is taken into account, while it is taken into account that for real control systems the probability of error detection is quite high. Thus, the results of studying the operational periodic control systems have shown that the main parameters that affect the optimal period of control are the mean time between failures. The dependence of the optimal control period on the probability of recovery is shown for different values of the duration of recovery by a reliable method. As the probability decreases, the optimal control period also decreases, which is associated with the need to spend a large proportion of the time on restoration using a reliable method; the corresponding increase in average unit costs can be compensated by an increase in the frequency of control procedures, i. e. a decrease in the control period. The dependence of the minimum average unit cost of control and the optimal period of its implementation on the average time between the errors appearance is given. With constant durations of control and recovery procedures and constant error detection probability, the optimal control period decreases, and the minimum average unit cost increases somewhat with a decrease in the average time between failures. This can be explained as follows: the more often an error can occur, the more often you need to control in order to reduce the losses due to working with the error.

Keywords: automated system, management, efficiency, functioning, optimal period, control of calculations, costs, software, errors.

For citation:

Goloskokov, Konstantin P., Vitaliy V. Korotkov, and Aleksey A. Astapkovich. "Determination of the optimal period for computations control in complexes of automated control systems programs." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 885–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892.

УДК 338.45:65:004

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРИОДА КОНТРОЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В КОМПЛЕКСАХ ПРОГРАММ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

К. П. Голоскоков, В. В. Коротков, А. А. Астапкович

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

Целью настоящего исследования является определение оптимального периода контроля вычислений в сложных комплексах программного обеспечения автоматизированных систем управления. Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи, как анализ систем периодического контроля, который состоит в определении затрат производительности соответствующих вычислительных систем, а также обеспечении минимума этих затрат. Приводятся теоретические основы и описание процесса оценки

эффективности функционирования автоматизированных систем управления. Дано обоснование способа определения оптимального периода контроля вычислений в комплексах программ автоматизированных систем управления. Проведено аналитическое исследование систем контроля. Отличие рассмотренной постановки задач от существующих заключается в учете неполной достоверности обнаружения ошибок системой периодического контроля, при этом принимается во внимание, что для реальных систем управления вероятность обнаружения ошибки достаточно велика. Результаты исследования систем оперативного периодического контроля подтверждают, что основным параметром, оказывающим влияние на оптимальный период контроля, является среднее время наработки на отказ. Показана зависимость оптимального периода контроля от вероятности восстановления при разных значениях длительности этого процесса достоверным методом. Отмечается, что с уменьшением вероятности оптимальный период контроля также убывает, что связано с необходимостью расходования большей доли времени на восстановление достоверным методом; соответствующее возрастание средних удельных затрат можно компенсировать увеличением частоты проведения процедур контроля, т. е. уменьшением периода контроля. Приведена зависимость минимальных средних удельных затрат на контроль и оптимального периода его проведения от среднего времени между появлением ошибок. При постоянной длительности процедур контроля и восстановления и постоянной вероятности обнаружения ошибки оптимальный период контроля убывает, а минимум средних удельных затрат несколько возрастает с уменьшением среднего времени между сбоями. Сделан вывод о том, что во избежание появления ошибки необходимо осуществлять контроль в целях уменьшения потерь, вызванных работой по ее устранению.

Ключевые слова: автоматизированная система, управление, эффективность, функционирование, оптимальный период, контроль вычислений, затраты, программное обеспечение, ошибки.

Для цитирования:

Голоскоков К. П. Определение оптимального периода контроля вычислений в комплексах программ автоматизированных систем управления / К. П. Голоскоков, В. В. Коротков, А. А. Астапкович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 885–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892.

Введение (Introduction)

Необходимость в средствах оперативного контроля вычислений обусловлена тем, что в сложных комплексах программ управления всегда существует определенное количество невыявленных ошибок, которые могут приводить к различным вариантам нарушения работы системы управления: от незначительного искажения результатов до полного прекращения работы системы. Требование высокой достоверности и непрерывности выработки управляющих воздействий, недопустимость перерывов в работе и искажения в выдаче управляющих сообщений приводят к необходимости соответствующих средств защиты. Главным образом следует предусматривать меры защиты от ошибок, наиболее сильно искажающих конечные результаты. Необходимо оперативно обнаруживать последствия таких ошибок и принимать меры по их ликвидации. При этом важно учитывать длительность проявления ошибки и корректировать ход вычислительного процесса в целях устранения последствий ошибок [1]–[4].

Основная задача средств оперативной защиты от ошибок состоит в обеспечении непрерывности процесса управления. Одновременно система оперативного контроля может выполнять функции защиты от случайных сбоев и отказов в аппаратуре вычислительной системы. Следует также предусмотреть меры регистрации и индикации ошибок для последующего их анализа.

Для обеспечения защиты вычислительного процесса могут быть использованы различные виды избыточности [5]–[8]:

- *временная избыточность*, когда часть производительности вычислительной системы служит для контроля исполнения программ и восстановления вычислительного процесса (ресурсы производительности проектирования должны быть предусмотрены на этапе комплекса программ);
- *информационная избыточность*, предполагающая дублирование исходных и промежуточных данных для повышения их достоверности, а также обеспечивающая их восстановление при искажении;
- *программная избыточность* — заключается в применении в комплексах программ нескольких вариантов, различающихся методами решения задачи или программной реализации одного

и того же метода; при этом появляется возможность сопоставления результатов обработки и исключения искажений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Средства оперативного контроля и защиты от ошибок, построенные на основе временной избыточности, обуславливают необходимость решения оптимизационной задачи. В работе проанализировано решение задачи анализа системы периодического контроля, которая сводится к оценке затрат на контроль производительности сложных вычислительных комплексов автоматизированных систем управления с учетом достоверности контроля, а также к определению оптимального периода проведения процедур контроля, обеспечивающего минимум этих затрат [9]–[11].

Любая функционирующая система управления характеризуется средним временем наработки на сбой или отказ L . Интенсивность сбоев $\lambda = 1/L$ не зависит от системы и методов контроля, выступая в качестве определяющей величины при выборе ее структуры. От момента появления ошибки до момента выполнения процедуры контроля для обнаружения ошибки проходит некоторое время, продолжительность которого оказывает влияние на эффективности работы вычислительного комплекса автоматизированной системы управления. Необнаружение ошибки в системе управления в течение времени t_2 характеризуется потерями b_2 за единицу времени пребывания в этом состоянии.

Система контроля характеризуется некоторой совокупностью параметров, позволяющих оценить ее эффективность. Каждая процедура контроля требует затрат на ее проведение, к которым относятся: t_1 — средняя длительность одной процедуры; b_1 — затраты в единицу времени на осуществление одной процедуры; x — среднее время между проверками. Система контроля характеризуется вероятностью обнаружения ошибки P_o , значение которой на практике всегда меньше единицы, а также вероятностью ложного обнаружения ошибки $P_{\text{л}}$.

Затраты на восстановление определяются следующими параметрами: $P_{\text{в}}$ — вероятность восстановления работоспособности системы при выбранном методе восстановления; b_3 — затрата в единицу времени на восстановление при данном способе восстановления; t_3 — время функционирования алгоритма восстановления. Методы восстановления [12]–[15] различаются затратами на их реализацию и влиянием на длительность оперативного контроля и восстановления. Наиболее достоверные методы требуют максимальных затрат ресурсов вычислительных комплексов автоматизированных систем управления. В связи с этим на практике экономичные методы сочетают с более достоверными по мере появления необходимости в этом. Критерием оценки эффективности системы контроля являются средние удельные затраты S^1 на оперативный контроль и восстановление.

Результаты (Results)

Аналитическое исследование систем контроля выполняется при соблюдении следующих условий:

- поток ошибок описывается стационарным пуассоновским потоком;
- контроль осуществляется периодически с интервалом x ;
- интенсивность потока ошибок намного меньше интенсивного потока проверок;
- вероятность ложного обнаружения ошибки равна нулю, а процедура восстановления экономичным способом заканчивается успешно при соблюдении следующих условий: $P_{\text{л}} = 0$; $P_{\text{в}} = 1$.

Отличие рассматриваемой постановки задачи от приведенной в работе [16] состоит в учете неполной достоверности обнаружения ошибки системой периодического контроля $P_o < 1$. При этом принимается во внимание, что для реальных систем управления вероятность обнаружения ошибки достаточно невелика $P_o > 0,5$. Поскольку интенсивность сбоев намного меньше интенсивности проверок, вероятностью поступления очередного сбоя раньше, чем завершится восстановление после предыдущего сбоя, можно пренебречь. Это позволяет рассматривать средние удельные

¹ Под затратами понимается время, необходимое на обнаружение, локализацию и устранение последствий ошибок, а также потери запаздывания в обнаружении.

потери как отношение средних потерь за один цикл между поступлением сбоев к длительности этого цикла.

Пусть ошибка возникла после k -й проверки в момент времени t . Интервал между сбоями является случайной величиной с функцией распределения $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$. Тогда затраты на контроль составляют $(k + 1)$. Потери из-за работы с ошибкой можно описать следующим выражением:

$$b_2[(k+1)x-t]P_0 + b_2[(k+2)x-t](1-P_0)P_0 + b_2[(k+3)x-t](1-P_0)^2P_0 + \\ + b_2[(k+4)x-t](1-P_0)^3P_0 + \dots$$

Остальные члены, умноженные на $(1 - P_0)^n$, где $n > 3$, можно опустить, так как в реальных системах P_0 достаточно велико. Затраты на восстановление вычислительного процесса после обнаружения ошибки составляют b_3t_3 . Средние потери за все время функционирования можно представить следующим образом:

$$E = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{kx}^{(k+1)x} \{b_1t_1(k+1) + b_2[(k+1)x-t]P_0 + \\ + b_2[(k+2)x-t](1-P_0)P_0 + b_2[(k+3)x-t](1-P_0)^2P_0 + \\ + b_2[(k+4)x-t](1-P_0)^3P_0\} dF(t) + b_3t_3. \quad (1)$$

Проинтегрировав и получив сумму ряда, можно найти следующее выражение для средних потерь:

$$E = \frac{t_1b_1}{1-e^{-\lambda x}} + b_2P_0(4-6P_0+4P_0^2-P_0^3)\left(\frac{x}{1-e^{-\lambda x}} - \frac{1}{\lambda}\right) + \\ + b_2P_0x(6-14P_0+11P_0^2-3P_0^3)b_3t_3.$$

Средняя длительность цикла, заканчивающегося восстановлением, определяется средним временем наработки на отказ $L = 1/\lambda$, временем пребывания в состоянии необнаруженного сбоя и временем восстановления t_b :

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{kx}^{(k+1)x} \{[(k+1)x-t]P_0 + [(k+2)x-t](1-P_0)P_0 + \\ + [(k+3)x-t](1-P_0)^2P_0 + [(k+4)x-t](1-P_0)^3P_0\} dF(t) + t_1 + t_2$$

Выполнив интегрирование и суммирование, получим следующее выражение:

$$T_1 = P_0\left(\frac{x}{1-e^{-\lambda x}} - \frac{1}{\lambda}\right)(4-6P_0+4P_0^2-4P_0^3) + \\ + P_0x(6-14P_0+11P_0^2-3P_0^3) + \frac{1}{\lambda} + t_1 + t_3. \quad (2)$$

Средние удельные потери, в соответствии с определением, равны отношению средних потерь E за один цикл, заканчивающийся восстановлением, к длительности цикла T_1 :

$$S = E / T_1. \quad (3)$$

При неполной достоверности обнаружения ошибки системой периодического контроля средние удельные потери (3) должны рассчитываться с учетом средних потерь в течение всего времени функционирования (1) и средней длительности цикла, заканчивающегося восстановлением (2).

Анализ полной системы периодического контроля с учетом достоверности контроля $P_0 \neq 0$ и надежности восстановления $P_b \neq 1$ выполнен методом статистического моделирования [17], поскольку аналитические способы приводят к достаточно громоздким выражениям, малоприменимым для практического использования. Результаты, полученные при моделировании системы контроля с соблюдением условий $P_0 = 0$ и $P_b = 1$, практически совпадают с данными, полученными из приведенных ранее аналитических выражений.

Вероятность обнаружения ошибки с выполнением процедуры контроля и вероятность восстановления работоспособности экономичным методом должны быть достаточно велики, а вероятность ложного обнаружения ошибки процедурой контроля очень мала. В связи с этим рассматриваются системы контроля с вероятностью обнаружения ошибки больше 0,5, вероятностью восстановления экономичным методом больше 0,4 и вероятностью ложного обнаружения ошибки меньше 0,05. Длительность процедуры контроля изменяется в диапазоне 0,1–10 с, длительность процедур восстановления экономичным t_3 и достоверным t_d методами продолжительностью, соответственно, 6–600 с и 60–3600 с. С учетом указанных диапазонов на рис. 1–3 приняты следующие значения параметров:

- вероятность обнаружения $P_0 = 0,8$;
- вероятность восстановления $P_v = 1,0$ (кроме рис. 2); вероятность ложного обнаружения $P_d = 0$;
- длительность процедуры контроля $t_1 = 6$ с;
- длительность экономического восстановления $t_3 = 60$ с.

Среднее время L между возникновением ошибок изменяется от 1 ч до 100 ч.

На рис. 1 приведена зависимость средних удельных затрат S от периода контроля X при разных периодах возникновения ошибок. Кривые имеют экстремальный характер, причем минимум функции потерь соответствует оптимальному периоду проведения процедур контроля. Минимальное значение средних удельных потерь с ростом среднего времени между ошибками имеет тенденцию к уменьшению.

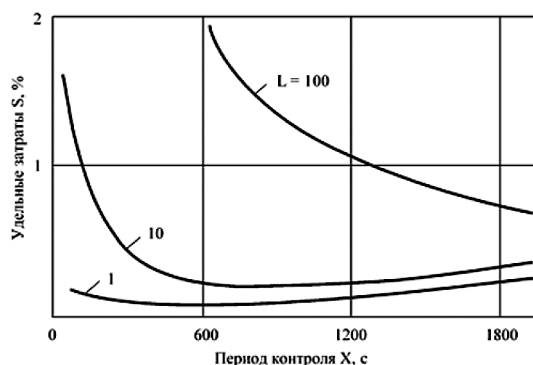


Рис. 1. Зависимость удельных затрат от периода контроля [6]

На рис. 2 показана зависимость оптимального периода контроля X от вероятности восстановления P_v при разных значениях длительности восстановления достоверным методом t_d . С уменьшением вероятности P_v оптимальный период контроля также убывает, что связано с необходимостью большую долю времени тратить на восстановление достоверным методом; соответствующее возрастание средних удельных затрат можно компенсировать увеличением частоты проведения процедур контроля, т. е. уменьшением периода контроля.

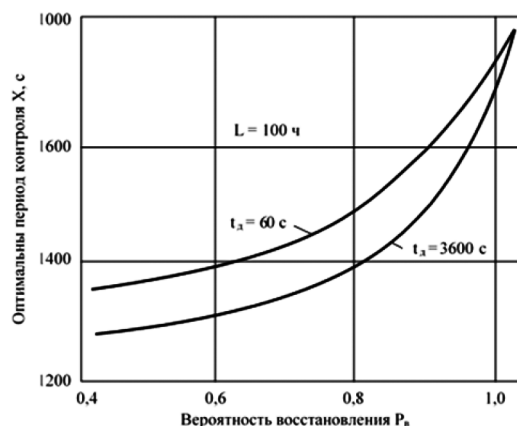


Рис. 2. Зависимость оптимального периода контроля от вероятности восстановления [6]

На рис. 3 приведена зависимость минимальных средних удельных затрат S на контроль и оптимального периода его проведения X от среднего времени L между появлением ошибок. Как видно из рассмотрения кривых, при постоянной длительности процедур контроля и восстановления и постоянной вероятности P_0 обнаружения ошибки оптимальный период контроля убывает, а минимум средних удельных затрат несколько возрастает с уменьшением среднего времени L между сбоями. Это можно объяснить следующим: чем чаще вероятность появления ошибки, тем чаще нужно осуществлять контроль в целях уменьшения потерь, вызванных работой по устранению ошибки. С ростом длительности процедуры контроля оптимальный период контроля увеличивается, поскольку в противном случае возрастут средние удельные затраты на его проведение.

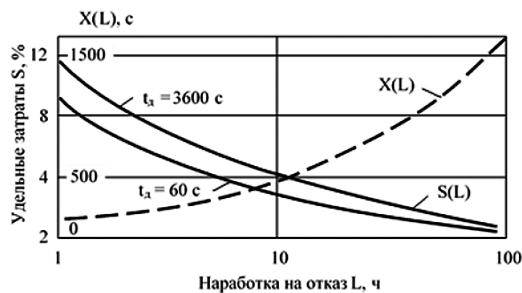


Рис. 3. Зависимость удельных затрат S и оптимального периода контроля $X(L)$ от времени наработки на отказ L [6]

Таким образом, для определения оптимального периода контроля вычислений в сложных комплексах программного обеспечения автоматизированных систем управления требуется определить затраты производительности вычислительных систем на контроль, а также обеспечить их минимум. При этом расчет затрат необходимо производить с учетом неполной достоверности обнаружения ошибки системой оперативного периодического контроля.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты исследования систем оперативного периодического контроля показывают, что основным параметром, влияющим на оптимальный период контроля X , является среднее время L наработки на отказ.
2. Такие параметры, как длительность восстановления экономичным $t_э$ и достоверным $t_д$ методами, вероятность обнаружения ошибки процедурой контроля $P_о$, вероятность восстановления экономичным методом $P_в$, вероятность ложного обнаружения ошибки $P_л$, в рассмотренных диапазонах их изменения оказывают не столь существенное влияние на оптимальный период контроля. При этом оптимальный период контроля при среднем времени между ошибками от 1 до 100 ч должен быть на 2–2,5 порядка меньше.

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. 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.
12. Брусакова И. А. Информационные технологии в научных исследованиях высшей школы / И. А. Брусакова, М. П. Власов, К. П. Голоскоков. — СПб., 2012. — 160 с.
13. Голоскоков К. П. Автоматизированная система испытаний в структуре системы управления качеством / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2008. — № 6 (69). — С. 116–120.
14. Кудинов Ю. И. Нечеткие модели и системы управления / Ю. И. Кудинов, А. Ю. Келина, И. Ю. Кудинов, А. Ф. Пащенко, Ф. Ф. Пащенко. — М.: Ленанд, 2017. — 328 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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. Goloskokov, K.P. "Prognozirovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh system." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(53) (2008): 164–168.
12. Brusakova, I.A., M. P. Vlasov, and K. P. Goloskokov. *Informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh vysshei shkoly*. SPb., 2012.
13. Goloskokov, K.P. "Avtomatizirovannaya sistema ispytaniy v strukture sistemy upravleniya kachestvom." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* 6(69) (2008): 116–120.
14. Kudinov, Yu.I., A. Yu. Kelina, I. Yu. Kudinov, A. F. Pashchenko, and F. F. Pashchenko. *Nechetkie modeli i sistemy upravleniya*. M.: Lenand, 2017.
15. 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 Politekh. un-ta, 2015.
16. 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.
17. 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

Коротков Виталий Валерьевич — доцент

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

Korotkov, Vitaliy V. — Associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: korotkovvv@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 28 июля 2023 г.
Received: July 28, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902

APPLICATION OF SHIP'S INFORMATION SYSTEM TO CONTROL AND MONITOR THE TECHNICAL CONDITION OF SHIP'S EQUIPMENT

D. E. Burkov

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

Failures and breakdowns of marine equipment that occur during the daily operation of ships can lead to major accidents, endangering the lives of the crew and passengers of ships, and also pose a threat to the environment. A project for using a ship information system to monitor the technical condition of ship power equipment in real time through integration with ship automated systems is presented in the paper. The implementation of the information system was carried out on the Handy Size dry-cargo vessel with a deadweight of 36,987 tons, during which an analysis of ship systems was carried out and sources for obtaining initial information were identified. These were AMS system (alarm monitoring system), technical control system of MAN 5S50ME-B "CoCoS" main engine condition, equipment on the navigation bridge (AIS, GPS, ECDIS, VDR). During the implementation of the project, a secure connection to the above-mentioned ship systems for collecting and processing information using the installed Dataloger computer with software was made. Channels for transmitting information to the shore through the satellite Internet and mobile communication systems using data coding and compression to reduce traffic volume were determined. The use of the implemented information system makes it possible to remove some of the routine tasks for the crew and the onshore technical service, to obtain more accurate information on the formation and control of maintenance tasks in real time.

Keywords: ship's information system, ship diesel engine, diagnostics, monitoring system, technical condition.

For citation:

Burkov, Dmitrii Ye. "Application of ship's information system to control and monitor the technical condition of ship's equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 893–902. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902.

УДК 629.12.004.67

ПРИМЕНЕНИЕ СУДОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д. Е. Бурков

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

Предметом обзорного исследования является проблема выхода из строя судового оборудования, возникающая в период эксплуатации судов, которая может привести к крупной аварии, создать угрозу для здоровья или жизни людей, а также нанести ущерб окружающей среде. Отмечается, что своевременное обнаружение неисправностей оборудования и предпосылки к возникновению поломок и отказов является одной из приоритетных задач технических служб и экипажей судов. В статье представлен результат разработки проекта использования судовой информационной системы для контроля технического состояния судового энергетического оборудования в режиме реального времени за счет интеграции с судовыми автоматизированными системами. Внедрение информационной системы выполнялось на сухогрузном судне типоразмера Handy Size дедвейтом (36 987 т.). С этой целью был выполнен анализ судовых систем и определены источники получения исходной информации: система аварийно-предупредительной сигнализации Alarm Monitoring System, система контроля технического состояния главного двигателя MAN 5S50ME-B CoCoS, оборудование на ходовом мостике (AIS, GPS, ECDIS, VDR). Отмечается, что в ходе реализации проекта выполнено безопасное подключение к указанным судовым системам для осуществления сбора и обработки информации с помощью установленного компьютера «Даталогер» с программным обеспечением, определены каналы передачи

информации на берег через системы спутникового интернета и мобильной связи с применением кодирования и компрессии данных для снижения объема трафика. Сделан вывод о том, что использование внедренной информационно-системы позволило упразднить часть рутинных задач для экипажа и береговой технической службы, а также получать более точную информацию по формированию и контролю задач по техническому обслуживанию в режиме реального времени.

Ключевые слова: судовые информационные системы, судовые энергетические установки, диагностика технического состояния, мониторинг технического состояния, предиктивное обслуживание.

Для цитирования:

Бурков Д. Е. Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования / Д. Е. Бурков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 893–902. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902.

Введение (Introduction)

Отказы и поломки судовых механизмов при эксплуатации судов торгового флота могут являться причинами крупных аварийных происшествий, подвергая опасности жизнь членов судового экипажа и пассажиров на борту, а также представляют угрозу для окружающей среды. Кроме того, вынужденные простои судна приводят к существенным убыткам и репутационным рискам для судовладельца и оператора судна, что негативно сказывается на бизнес-процессах. Своевременное техническое обслуживание судового оборудования позволяет существенно улучшить операционную деятельность флота и сократить количество вынужденных простоев. При этом существующая практика планово-предупредительной системы технического обслуживания в судоходстве представляет возможности для ее улучшения [1].

Развитие информационных технологий и вычислительной техники предоставляют новые возможности управления процессами и обработки данных при наличии соответствующей инфраструктуры, что позволяет быстро и экономично наращивать функциональность, обеспечивать безопасность и интеграцию со сторонними системами и источниками данных. Современные информационные системы и средства технической диагностики предусматривают использование широкого спектра рабочих параметров, реализацию сложных алгоритмов сбора, обработки, хранения и представления информации. Поэтому достоверная оценка технического состояния оборудования на стадии эксплуатации предполагает использование соответствующего диагностического инструментария, составными частями которого являются информационное, методическое, алгоритмическое, программное и организационное обеспечение. Таким образом, внедрение новых информационных систем мониторинга технического состояния судового оборудования, обеспечивающих возможность обработки параметров и предлагающих выбор верного действия для судового экипажа и береговых технических служб, имеет большое значение и является актуальным [2]. Подобные информационные системы (Vessel Performance Monitoring System) активно внедряются в зарубежных судоходных компаниях для решения задач по сбору и анализу технической информации, мониторингу технического состояния судовых механизмов в режиме реального времени, анализу и прогнозированию безопасного маршрута следования судна в зависимости от погодных условия, контролю расхода топлива, организации технического обслуживания судна и др.

Целью статьи является разработка и внедрение информационной системы мониторинга технического состояния судового оборудования, особенностью которой является способность предупреждать отказы, что, в свою очередь, позволит осуществить переход от планово-предупредительной системы обслуживания к функциональному обслуживанию по состоянию (Predictive Maintenance) на балкерном судне проекта Seahorse 375 грузоподъемностью 37 400 т.

Для решения поставленной задачи необходимо:

- изучить судовую проектную документацию для определения текущего уровня автоматизации судна;
- на основании выполненного анализа определить перечень требуемого к установке оборудования и конфигурацию программного обеспечения;

- выбрать оптимальные точки подключения к судовому оборудованию для сбора необходимой информации и последующего анализа;
- разработать и согласовать с судовладельцем и техническим оператором судна схемы подключения оборудования, получив соответствующее разрешение;
- определить каналы передачи собранной информации на берег [3].

Методы и материалы (Methods and Materials).

Работа по интеграции информационной системы на судно выполнялась командой специалистов, состоящей из ведущего специалиста по организации процессов разработки ПО и BigData, эксперта по анализу данных и машинному обучению, программиста и технического суперинтенданта. Исследование проводилось на сухогрузном судне типоразмера Handy size одной из отечественных судоходных компаний. Это современное судно, построенное в Китае в 2014 г. и оборудованное системами слежения и контроля параметров судовых механизмов (AMS — Alarm Monitoring System). В качестве главной энергетической установки на судне проекта Seahorse 375 установлен двухтактный дизель MAN 5S50ME-B (CSR 5675 кВт/ 95,4 RPM) с электронным управлением. Основные характеристики судна и чертеж с главными размерениями приведены на рис. 1.

Основные размерения судна:

длина максимальная	180,00	м
максимальная длина между перпендикулярами	176,75	м
максимальная длина по летней ВЛ	174,60	м
ширина по миделю	30,00	м
ширина по ходовому мостику	14,70	м
объем груза (100 %)	46,700	м ³
дедвейт	37,400	т
осадка	10,10	м
расчетная осадка	10,65	м
средняя скорость	14,00	уз
мощность ДГ при средней скорости	5,675	кВт

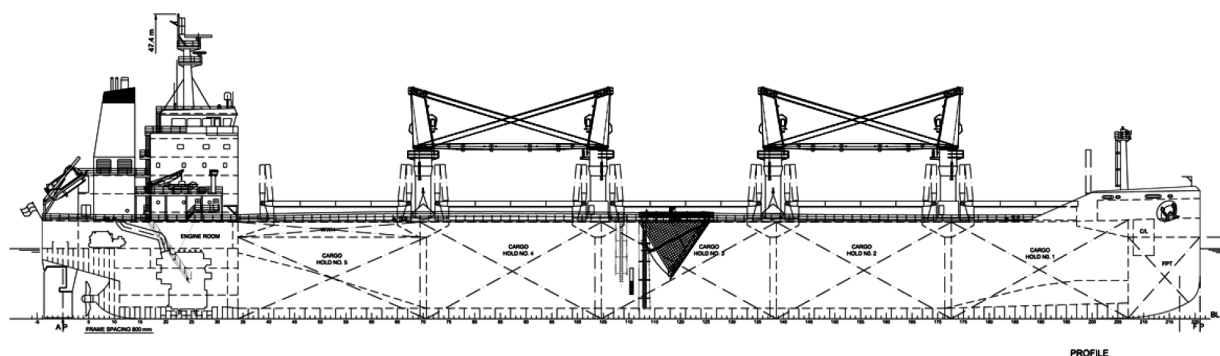
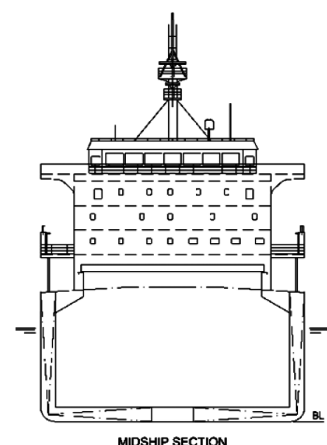


Рис. 1. Чертеж и основные характеристики судна проекта Seahorse 375
(Источник заимствования: построечная документация судна)

В рамках реализации проекта проведено несколько посещений судна во время его стоянки в портах РФ в период 2019–2020 гг. для инспекции судна, изучения технической документации и материальной части, сбора необходимого материала, общения с судовым экипажем для выявления основных проблемных вопросов по организации технического обслуживания. Предварительный проект подключения оборудования был направлен судовладельцу для получения согласования. Для сбора технической информации с судовых устройств на судне был установлен промышленный компьютер «Даталогер» на базе системного блока Hewlett Packard, выполняющий задачу по сбору, хранению и передаче данных.

Контроль технического состояния судовых механизмов и предупреждение поломок предполагает выполнение следующих работ:

- сбор информации о величинах измеряемых параметров и формирование базы данных допустимых отклонений;
- анализ отклонений и сравнение с допустимыми нормативно-техническими или конструкторскими параметрами объекта (двигателя, его механизмов и судовых систем) [4];
- в случае превышения допустимых значений выполнение идентификации неисправности механизмов и оборудования;
- формирование прогноза изменения технического состояния судовых механизмов на основе полученных данных.

В качестве основных источников сбора данных выбраны следующие интегрированные судовые системы:

1. AMS (Alarm Monitoring System), или система аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) с установленным ПО PRAXIS.
2. Система контроля технического состояния ГД MAN CoCoS.
3. Навигационная система на ходовые мостики (VDR, AIS, GPS, ECDIS).

Рассмотрим состав и функционал указанных систем более подробно.

1. AMS (Alarm Monitoring System) — основная судовая система аварийной предупредительной сигнализации в машинном отделении, состоящая из двух промышленных компьютеров, щита управления, периферийных устройств, соединяющих кабелей и датчиков. В систему AMS поступает информация с основных судовых механизмов: судовой электростанции, судовых дизель-генераторов, судовых насосов и др. Элементы системы AMS находятся в машинном отделении центрального поста управления [5].

Подключение к судовой системе AMS (рис. 2) обеспечило возможность сбора информации и параметров рабочего процесса со следующих механизмов: ГД, ДГ (дизель-генератор № 1–3), балластной системы, системы охлаждения забортной водой, системы охлаждения пресной водой, турбокомпрессор, компрессоры сжатого воздуха, дренажной системы и др.

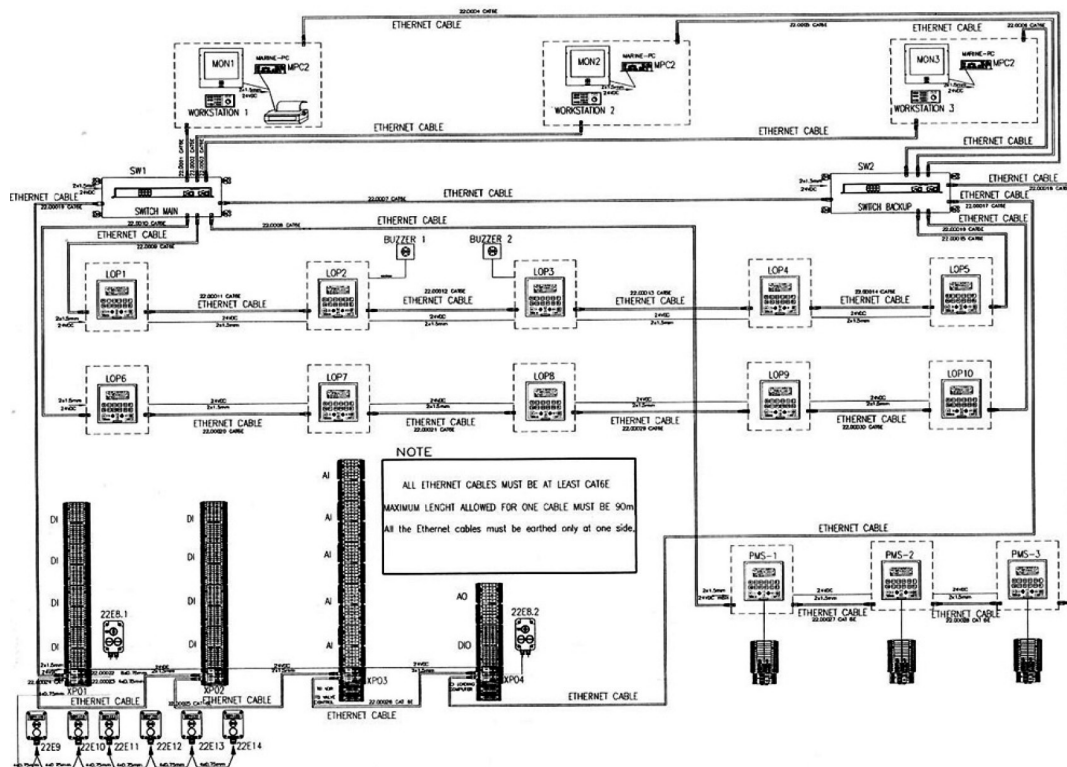


Рис. 2. Принципиальная схема системы AMS PRAXIS
(Источник заимствования: Инструкция AMS PRAXIS)

2. Система контроля технического состояния ГД CoCoS — это фирменное аппаратное и программное обеспечение производителя MAN для дизелей с электронным управлением. Программный комплекс, обеспечивающий сбор основных параметров главного двигателя (ГД), их анализ с возможностью диагностики и индизирования дизеля в режиме реального времени, состоит из двух дублирующих друг друга компьютеров, а также набора датчиков и ПО, расположенных в ЦПУ [6].

Ключевыми параметрами при наблюдении за работой дизеля MAN 5S50ME-B являются: барометрическое давление, скорость двигателя, осадка судна, среднее индикаторное давление, давление сжатия, максимальное давление сжатия, индекс топливного насоса, давление выпускных газов, температура выпускных газов, частота оборотов турбонагнетателя, давление надувочного воздуха, температура надувочного воздуха, обратное давление выхлопных газов в выпускной трубе после турбонаддува, температура воздуха перед фильтрами турбокомпрессора, Δp воздушного фильтра (если установлен измерительный прибор), Δp воздушного холодильника, температура воздуха и охлаждающей воды перед и после холодильника надувочного воздуха [7]. Схема основных точек сбора информации на ГД MAN 5S50ME-B в местах установки датчиков приведена на рис. 3.

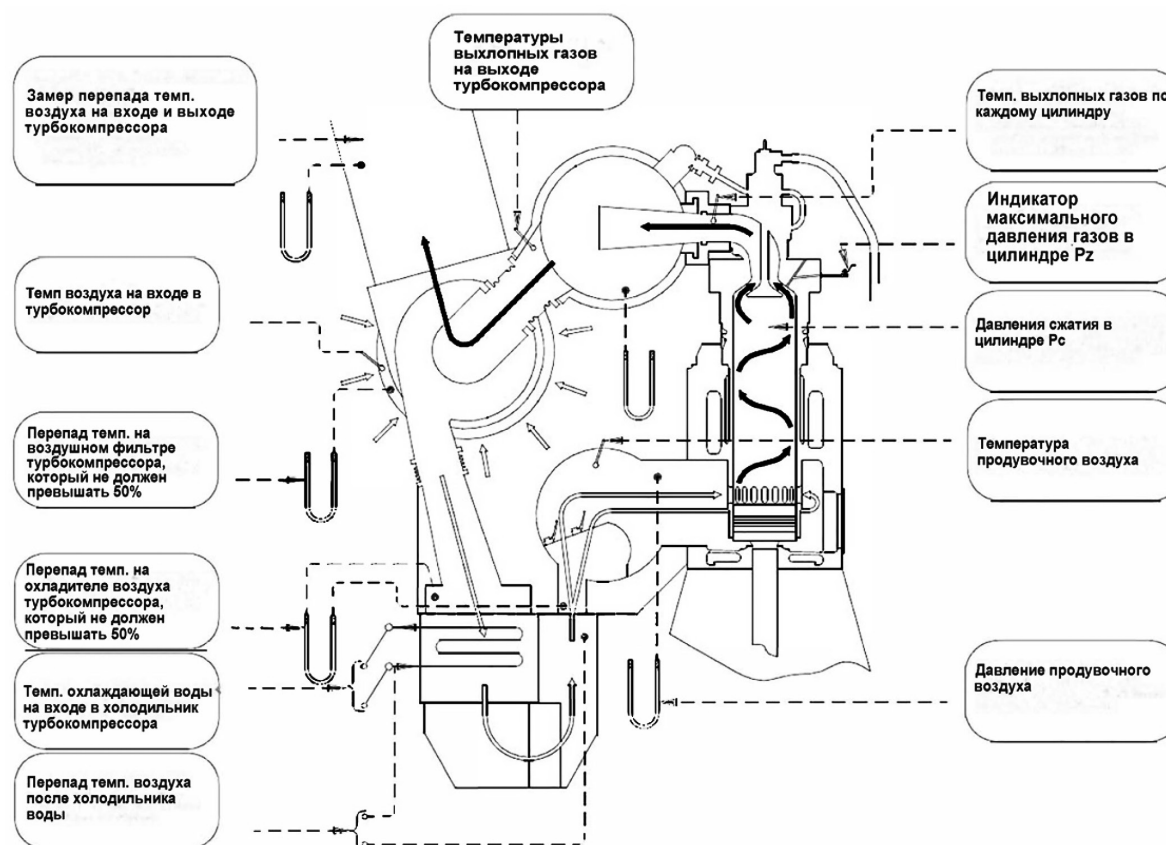


Рис. 3. Точки выполнения измерений ГД MAN 5S50ME-B

(<https://mirmarine.net/dvs/man-b-w/1240-dvigateli-man-b-w-tipa-me-s-elektronnym-upravleniem>, 2023)

Подключение и расшифровка данных из системы ГД MAN CoCoS позволили аккумулировать и обрабатывать рабочие и диагностические параметры ГД, а также получать информацию о текущей мощности и числе оборотов дизеля.

3. Навигационная система на ходовом мостике (AIS, GPS, ECDIS, VDR). Сбор навигационных параметров и ходовых показателей судна (курс, скорость, местоположение судна, запись радаров) выполнено при подключении к судовому самописцу VDR (voyage data recorder), установка которого на судне регламентирована требованием конвенции СОЛАС [8]. На ходовом мостике установлен VDR FURUNO VR 3000, выполняющий запись информации с радаров, GPS, УКВ радиостанции, системы АПС. Принципиальная схема VDR FURUNO VR 3000 приведена на рис. 4.

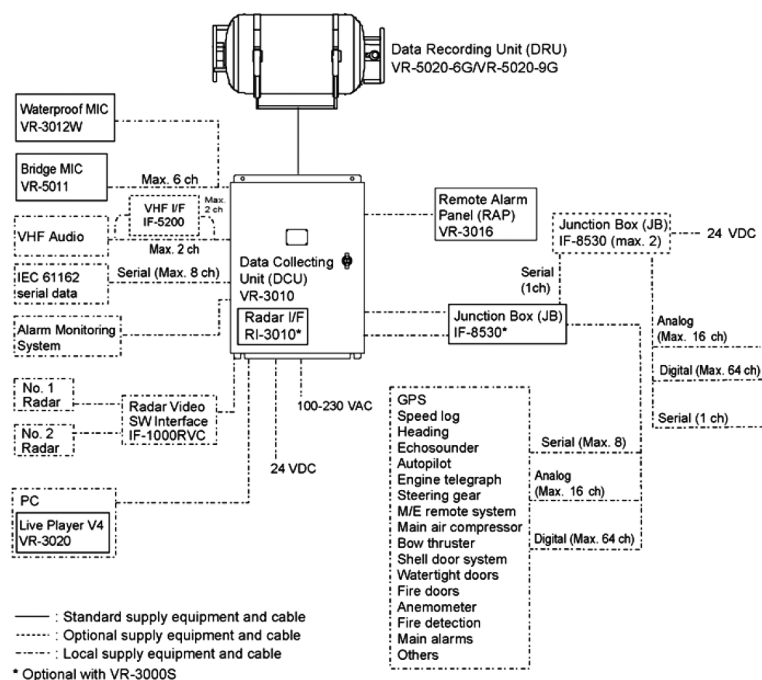


Рис. 4. Принципиальная схема VDR FURUNO VR 3000
(Источник заимствования: Инструкция VDR FURUNO VR 3000)

Непосредственно подключение VDR к компьютеру «Даталогер» выполнялось через отдельный порт IEEE 1394 (рис. 5).

а)



б)

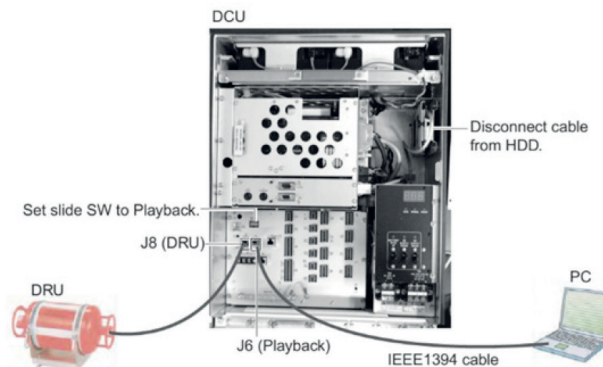


Рис. 5. Вид блока VDR (а) и схема подключения к компьютеру (б)
(Источник заимствования: Инструкция VDR FURUNO VR 3000)

Подключение к навигационной системе судна, расположенной на ходовом мостике, позволило аккумулировать информацию о текущем положении судна, его скорости и заданном маршруте. Таким образом, при подключении к судовым системам обеспечена возможность сбора, передачи, хранения и анализа информации, поступающей с различных судовых механизмов и устройств. Основная сложность в этой работе заключалась в расшифровке собранного массива данных и сепарации информации по объектам исследования [9].

Дальнейшее выстраивание информационной системы осуществлялось по следующей схеме: информация от AMS, VDR и CoCos через сетевое оборудование поступает на компьютер «Даталогер» (рис. 6), в котором установлено программное обеспечение (ПО) для сбора и передачи данных, а также ПО для работы экипажа.

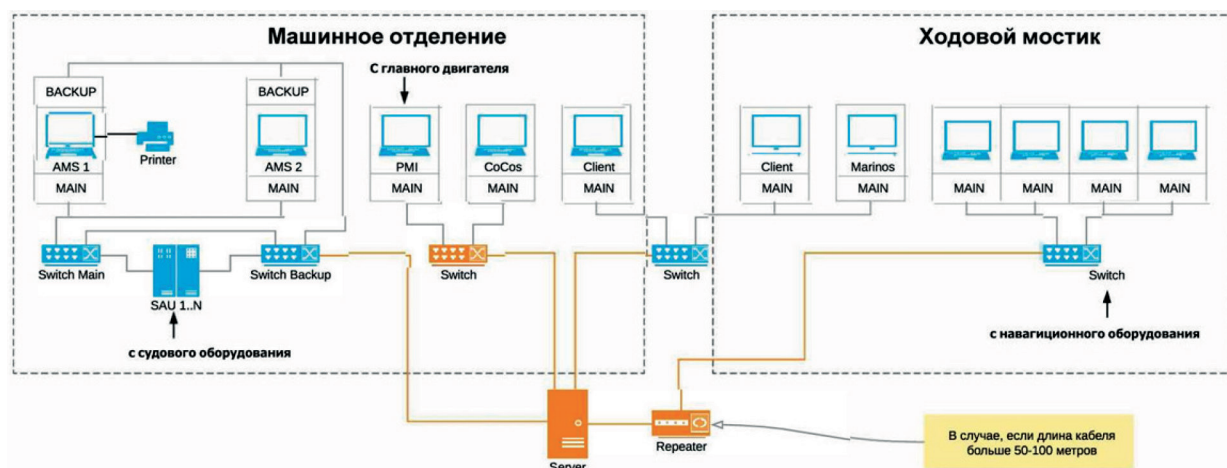


Рис. 6. Схема подключения судового оборудования к «Даталогеру»

Компьютер «Даталогер» безопасно объединяет все судовые системы в единое целое, предоставляя экипажу возможность анализа рабочих параметров судовых механизмов с построением графиков и прогнозированием основных трендов [10].

Результаты (Results)

Главной особенностью, внедренной на судно информационной системы, является использование ресурсов установленного оборудования, что позволяет минимизировать расходы на установку компонентов системы, основными из которых являются: компьютер «Даталогер», сетевое оборудование, оборудование для передачи информации на берег [11]. Все установленные компоненты системы безопасно интегрированы в судовые системы, не вторгаясь в налаженные процессы. Все собранные данные хранятся и передаются в зашифрованном виде. Пример интерфейса для работы с графиками параметров ДГ приведен на рис. 7.

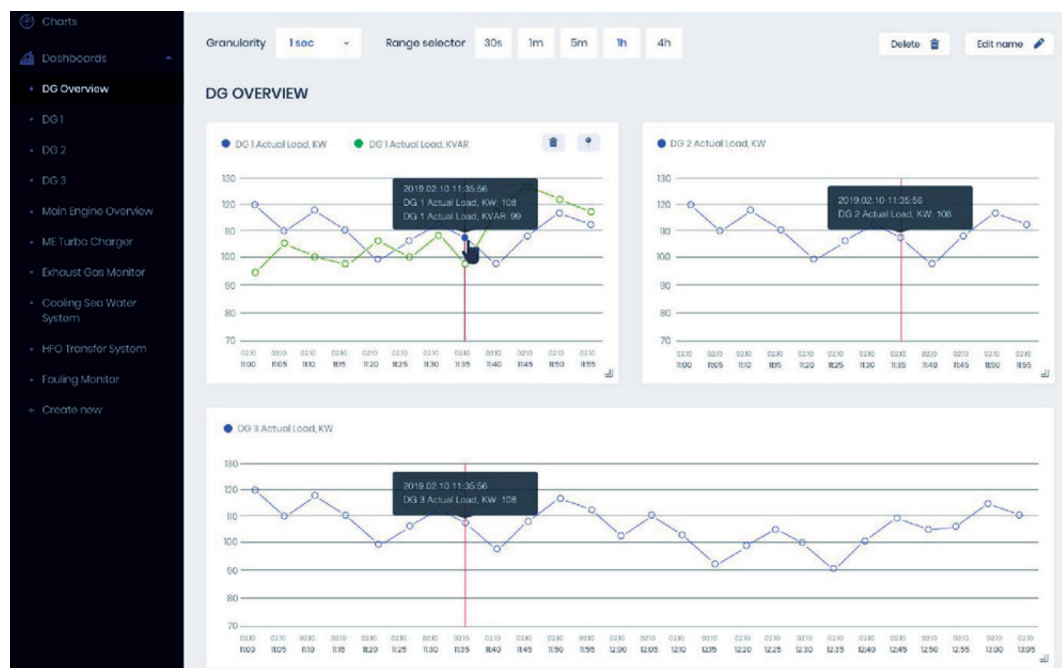


Рис. 7. Пример интерфейса системы для работы с графиками параметров дизель-генератора

Передача данных на береговой сервер с облачным интерфейсом обеспечивается через два канала:

1. Спутниковый интернет, используемый для передачи минимального набора данных для экономии средств на связь.

2. Мобильная связь для основного обмена данными во время стоянки судна в портах с помощью установленного модема с универсальной сим-картой, которая может работать в 197 странах мира. Для снижения расходов на передачу данных используется специальное кодирование и компрессия, которые снижают объем трафика до десяти раз, а также выбор гранулярности передаваемых параметров. Снижение трафика информации происходит за счет агрегации значений в течение определенных интервалов времени перед отправкой (например, средних оборотов двигателя за 5 минут [12]. В совокупности эти решения позволили сконфигурировать тот объем трафика, который будет отражать актуальную информацию о техническом состоянии судовых механизмов и тем самым позволит обеспечить возможность береговым службам и судовому экипажу принятие верного и своевременного решения. Структурная схема информационной системы, установленной на борту судна, приведена на рис. 8.

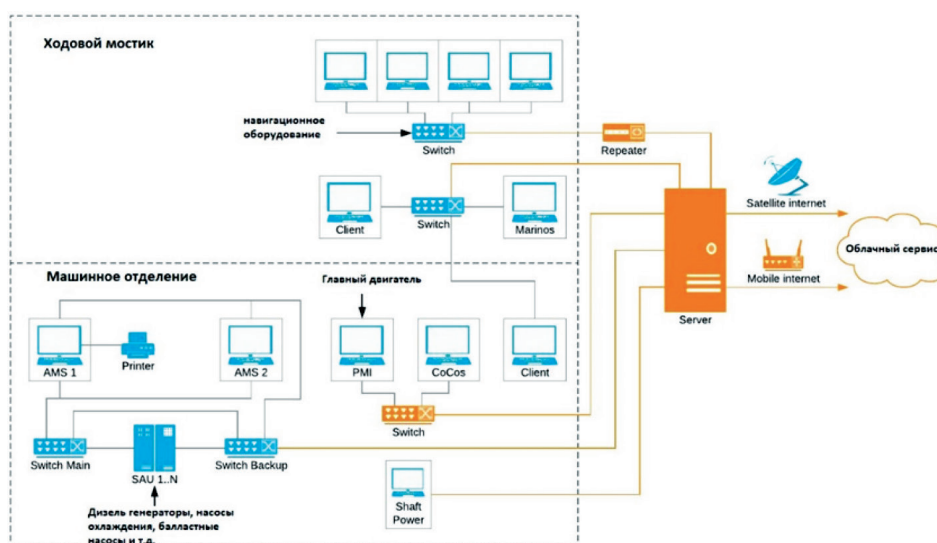


Рис. 8. Принципиальная схема судовой информационной системы

Очевидно, что применение дистанционной системы диагностики и мониторинга технического состояния дизелей на судах выводит их на более высокий уровень по классификации, дает ряд преимуществ, снижающих эксплуатационные затраты, так как судно может быть сертифицировано в системе качества ISO 9000, что снизит затраты на страхование грузов и периодические освидетельствования.

Заключение (Conclusion)

Внедрение информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судовых механизмов и ее интеграция с судовым оборудованием позволили аккумулировать и выполнять обработку информации о параметрах главного двигателя, турбокомпрессора ГД, дизель-генераторов, системы выхлопных газов, системы охлаждения пресной и забортной воды и др., а также устранить рутинные задачи для экипажа и береговой технической службы, получать более точную информацию по формированию и контролю параметров работы механизмов в режиме реального времени.

Для решения задачи по предиктивному обслуживанию судовых механизмов обеспечена возможность сбора необходимого объема данных и их обработки с помощью инструментов машинного обучения (нейросети) и BigData. С точки зрения коммерческой целесообразности внедрения подобной системы на судах, учитывая опыт зарубежных стартапов, экономия операционных расходов на содержание флота (OPEX) может составлять до 10 % за счет сокращения затрат на ремонт оборудо-

вания, закупку горюче-смазочных материалов, сокращения количества поломок и вынужденных простоев судов, оптимизации процесса взаимодействия экипажа судна и береговой службы. Таким образом, внедренная на судне система показала перспективность применения на других судах проекта SEAHORSE 375 для мониторинга и диагностирования технического состояния судового оборудования. Исследования в области развития созданной информационной системы и расширения ее функционала будут продолжены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванченко А. А.* Предпосылки и перспективы использования достоверных показаний встроенных диагностических систем и переносных средств при эксплуатации механического оборудования судов / А. А. Иванченко, Д. Е. Бурков // Труды научно-технической конференции молодых научных сотрудников СПГУВК. — СПб.: СПГУВК, 2005. — Т. 1. — С. 264–274.
2. *Иванченко А. А.* Аппаратное и методическое обеспечение мониторинга и диагностирования технического состояния дизельных установок судов в рамках планово — предупредительной системы обслуживания с контролем состояния / А. А. Иванченко, П. А. Васин, Д. Е. Бурков // Труды 11-го Международного научно-технического семинара «Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: СПГУВК, 2008. — С. 130–135.
3. *Окунев В. Н.* Современные системы диагностики и мониторинга технического состояния судовых дизелей / В. Н. Окунев, Д. Е. Бурков // Морская радиоэлектроника. — 2010. — № 3–4 (33–34). — С. 40–43.
4. *Соловьёв А. В.* Предпосылки к созданию единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой / А. В. Соловьёв // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2018. — № 1 (120). — С. 59–64. DOI: 10.46960/1816–210X_2018_1_59.
5. *Кулагин А. В.* Формирование информационных потоков при диагностировании судовых энергетических установок / А. В. Кулагин // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 70. — С. 77–86. DOI: 10.37890/jwt.vi70.237.
6. *Куколев А. А.* Основные направления развития систем диагностирования двигателей внутреннего сгорания на морском транспорте / А. А. Куколев, Д. Л. Пиотровский // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. — 2019. — № 1 (236). — С. 51–56.
7. *Железняк А. А.* Проблема диагностики судового энергетического оборудования / А. А. Железняк, В. В. Ениватов, В. А. Доровской // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1123–1132. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1123-1132.
8. *Соловьёв А. В.* Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой / А. В. Соловьёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1027–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039.
9. *Жуков В. А.* Информационно-измерительные системы для испытаний судовых дизелей / В. А. Жуков, О. В. Мельник // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития / Материалы международной научно-технической конференции: в 2 ч. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2019. — Ч. 2. — С. 16–19.
10. *Кочергин В. И.* Контроль расхода топлива энергетических установок на основе регистрации текущих значений мощности / В. И. Кочергин, Е. С. Зинченко // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 78–89. DOI: 10.37890/jwt.vi72.282.
11. *Логунов А. В.* Применение нейросетевого подхода для диагностики двигателя внутреннего сгорания транспортных средств / А. В. Логунов, А. Л. Береснев // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2022. — № 1 (225). — С. 162–172. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-162-172.
12. *Саушев А. В.* Оперативная идентификация технического состояния судовой электростанции для решения задач предупредительного управления / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 306–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318.

REFERENCES

1. Ivanchenko, A. A., and D. E. Burkov. "Predposylki i perspektivy ispol'zovaniya dostovernykh pokazanii vstroennykh diagnosticheskikh sistem i perenosnykh sredstv pri ekspluatatsii mekhanicheskogo oborudovaniya"

sudov.” *Trudy nauchno-tekhnikeskoi konferentsii molodykh nauchnykh sotrudnikov SPGUVK*. Vol. 1. SPb.: SPGUVK, 2005. 264–274.

2. Ivanchenko, A. A., P. A. Vasin, and D. E. Burkov. “Apparatus and methodical assurance of monitoring and diagnostics of technical condition of diesel engines of ships in accordance with the plan — predictive system of servicing with control of condition.” *Trudy 11-go mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminara «Issledovanie, projektirovanie i ekspluatatsiya sudovykh DVS»*. SPb.: SPGUVK, 2008. 130–135.

3. Burkov, D. E., and V. N. Okunev. “Modern diagnostics and technical condition monitoring systems of ship diesel engines.” *Morskaya radioelektronika* 3–4(33–34) (2010): 40–43.

4. Soloviev, A. V. “The preconditions for the creation of a unified goal directed management of marine power plant.” *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva* 1(120) (2018): 59–64. DOI: 10.46960/1816–210X_2018_1_59.

5. Kulagin, A. V. “Formation of information flows during diagnostics of ship power plants.” *Russian Journal of Water Transport* 70 (2022): 77–86. DOI: 10.37890/jwt.vi70.237.

6. Kukolev, A. A., and D. L. Piotrovsky. “Main directions of development of diagnostic systems of internal combustion engines in maritime transport.” *The Bulletin of Adyge State University: Internet Scientific Journal* 1(236) (2019): 51–56.

7. Zheleznyak, Aleksandr A., Valerii V. Yenivatov, and Vladimir A. Dorovskoy. “Problem of ship power equipment diagnostic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1123–1132. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1123-1132.

8. Soloviev, Alexey V. “The concept of a unified goal directed management of marine power plant.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1027–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039.

9. Zhukov, V. A., and O. V. Melnik. “Information measuring systems for marine diesel engines testing.” *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii*. Vol. 2. Petropavlovsk-Kamchatskii: Kamchatskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2019. 16–19.

10. Kochergin V. I., and E. S. Zinchenko. “Fuel consumption monitoring of power plants based on the recording of current power values.” *Russian Journal of Water Transport* 72 (2022): 78–89. DOI: 10.37890/jwt.vi72.282.

11. Logunov, A. V., and A. L. Beresnev. “Application of the neural network approach to diagnose the internal combustion engine of vehicles.” *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 1(225) (2022): 162–172. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-162-172.

12. Saushev, Alexander V., and Nikolaj V. Shirokov. “Operational identification of the ship’s power plant technical condition for solving problems of preventive management.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 306–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бурков Дмитрий Евгеньевич —
аспирант, старший преподаватель
Научный руководитель:
Иванченко Александр Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: deburkov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Burkov, Dmitrii Ye. —
Postgraduate, Senior Lecturer
Supervisor:
Ivanchenko, Aleksandr 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: deburkov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17 мая 2023 г.
Received: May 17, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-903-914

MODAL SYNTHESIS OF OBSERVERS OF STATE VARIABLES OF SHIP DYNAMICAL SYSTEMS

A. A. Chertkov, Ya. N. Kask, V. Yu. Ivanyuk

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

The purpose of the work is to increase the information content of ship control systems through the use of dynamic observers, which are, in essence, mathematical information sensors and allow you to fully restore the vector of state variables of the object model with high accuracy by measuring the output vector of a smaller dimension. An algorithm for the synthesis of observers based on the modal method of parametric evaluation of their model is proposed. It provides obtaining the parameters of the regulator according to the given spectra of the matrices of the state of the observed system and the object by means of the Control Toolbox of the MATLAB computing environment. The use of the modal method (subject to the conditions of observability and controllability) guarantees the stability of observers, which allows them to be used for stable and unstable observed objects and systems. The algorithm of modal synthesis of observers is suitable for increasing the information content of a wide range of ship dynamic systems and, above all, control systems for ship energy complexes and their components. These include autopilots, control systems for ship power plants and their elements, dynamic complexes of satellite and inertial navigation systems and positioning of moving objects in remote control conditions, monitoring and safety tools, identifiers, etc. It has been shown that in the conditions of digital transformation, the use of observers dramatically improves the quality and reduces the time for modeling the dynamics of ship systems and energy complexes operated under conditions of external disturbances, which makes it possible to improve the algorithms for estimating state variables of a class of autonomous objects modeled by nonlinear equations that allow the transition in the working area to quasi linear models with time-invariant parameters. The proposed algorithm is demonstrated by the example of the synthesis of a three-dimensional observer for the control system of a supertanker with deadweight of 150 thousand tons. The simulation of the control object is performed with an input signal of triangular shape, which most fully corresponds to the real control signal, and it is implemented in the form of a program compiled in MATLAB codes. The obtained values of state variables and errors of their recovery correspond to the specified speed and the required stability of the control system.

Keywords: algorithm, modal method, synthesis, vessel, model, control, observer of state variables, output and control vectors, matrix.

For citation:

Chertkov, Alexandr A., Yaroslav N. Kask, and Vladimir Yu. Ivanyuk. "Modal synthesis of observers of state variables of ship dynamical systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 903–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-903-914.

УДК. 621.398.04

МОДАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. А. Чертков, Я. Н. Каск, В. Ю. Иванюк

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

Целью работы является повышение информативности систем управления судном путем применения динамических наблюдателей, являющихся, по существу, математическими датчиками информации и позволяющих с высокой точностью полностью восстанавливать вектор переменных состояния модели объекта по измерениям вектора выхода меньшей размерности. Предлагается алгоритм синтеза наблюдателей, базирующийся на модальном методе параметрической оценки их модели, который обеспечивает получение параметров регулятора по заданным спектрам матриц состояния наблюдаемой системы и объекта средствами Control Toolbox вычислительной среды MATLAB. Применение данного метода (при

соблюдении условий наблюдаемости и управляемости) гарантирует обеспечение устойчивости наблюдателей, что позволяет использовать их для устойчивых и неустойчивых наблюдаемых объектов и систем. Алгоритм модального синтеза наблюдателей пригоден для повышения информативности широкого спектра судовых динамических систем и прежде всего систем управления судовыми энергетическими комплексами и их компонентами, к которым относятся авторулевые, системы управления судовыми энергетическими установками и их элементами, динамические комплексы систем спутниковой и инерциальной навигации и позиционирования подвижных объектов в условиях дистанционного управления, средства мониторинга и обеспечения безопасности, идентификаторы и др. Показано, что в условиях цифровой трансформации применение наблюдателей кардинально повышает качество и сокращает время моделирования динамики судовых систем и энергетических комплексов, эксплуатируемых в условиях внешних возмущений, что позволяет совершенствовать алгоритмы оценки переменных состояния класса автономных объектов, описываемых нелинейными уравнениями, допускающими переход в рабочей области к квазилинейным моделям с инвариантными во времени параметрами. Предложенный алгоритм продемонстрирован на примере синтеза трехмерного наблюдателя системы управления супертанкером дедвейтом 150 тыс. т. Моделирование объекта управления выполнено при входном сигнале треугольной формы, наиболее полно отвечающей реальному сигналу управления, и реализовано в виде программы, составленной в кодах MATLAB. Полученные значения переменных состояния и ошибок их восстановления соответствуют заданному быстрдействию и требуемой устойчивости системы управления.

Ключевые слова: алгоритм, модальный метод, синтез, судно, модель, управление, наблюдатель переменных состояния, векторы выхода и управления, матрица.

Для цитирования:

Чертков А. А. Модальный синтез наблюдателей переменных состояния судовых динамических систем / А. А. Чертков, Я. Н. Каск, В. Ю. Иванюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 903–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-903-914.

Введение (Introduction)

Современные динамические системы управления судовыми энергетическими комплексами и их элементами характеризуются высокой размерностью математических моделей и сложностью. Надежность и безаварийность функционирования таких систем требуют решения задач, связанных с повышением информативности, измерениями текущих значений переменных состояния и восстановлением вектора состояния полной размерности по вектору выхода. Задачи восстановления сигналов, не подлежащих измерению, могут быть решены различными способами. Эти решения основаны на применении различных форм управления процессами организации сбора и обработки информации, которые базируются на характеристиках технического интеллекта (в частности, на оригинальных технических моделях), доступности, а также анализе технических компонент и отношений, характеризующих физические свойства и параметры наблюдаемых объектов. К ним относятся математические датчики информации, такие как динамические наблюдатели [1]–[3].

Применение на судах динамических наблюдателей позволяет качественно диагностировать и осуществлять мониторинг технического состояния энергетических комплексов путем повышения информативности средствами метрологического обеспечения с применением теории, методов измерений и обработки данных. Динамические наблюдатели, являющиеся, по сути, датчиками информации, адаптированными к каждому наблюдаемому объекту, обеспечивают высокую точность измерения вектора переменных состояния и его полное восстановление по выходной координате, а также выполняют функции фильтров сигналов за счет собственных частотных свойств. В случае неисправности штатные датчики заменяют математическими моделями в формате наблюдателей Д. Луенбергера [4].

Повышение информативности реализуют также путем конструирования наблюдателей и оценщиков, необходимых для дополнительного оборудования объектов и систем. Следует также отметить, что путем сравнения показаний штатных датчиков с данными, генерируемыми динамическими наблюдателями (математическими датчиками), диагностируют неисправность штатного оборудования, принимая превентивные меры во избежание возникновения нештатных ситуаций.

Оценку неисправностей выполняют по различным нормам ошибки, содержащимся в пакете функций MATLAB. Решение данной задачи возможно с применением оптимальных систем модального управления [5], [6], для реализации которых необходимо иметь достоверную информацию о всех компонентах фазовых координат вектора состояния, что значительно упрощает синтез модального регулятора [7]. На практике, ввиду различных причин, измерение вектора фазовых координат бывает зачастую затруднено.

Основными причинами, затрудняющими измерение полноразмерного вектора состояния, являются сложность и дороговизна применяемых измерительных средств, необходимость измерений производных от переменных состояния, а также неисправности, возникающие в информационной системе судна. Преодолеть эти трудности можно, если наряду с аппаратными средствами измерений, удастся применить математические датчики информации [8], [9], что необходимо для оптимального управления судовыми энергетическими комплексами с использованием динамических компенсаторов. Основой таких систем является подсистема в виде идентификатора состояний, представляющего собой замкнутую модель объекта, на входы которой кроме сигнала управления поступает сигнал невязки для формирования обратной связи по ошибке измерений. В результате становится возможной оценка переменных состояния объекта по переменным состояниям его наблюдателя. Обладая всеми свойствами динамической системы, наблюдатели выполняют функции динамических компенсаторов.

Актуальность проблемы синтеза наблюдателей и системный подход к ее решению, базирующийся на использовании цифровых технологий и интеллектуальных систем, определяются тем, что задачи оценки вектора переменных состояния судовых систем управления имеют свою специфику. В этой связи для получения наиболее простой (инвариантной во времени) структуры динамического наблюдателя, обладающей свойствами асимптотической устойчивости, в данной работе предлагается алгоритм его синтеза для судовых динамических систем различного назначения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим в пространстве состояний модель динамической системы, инвариантной во времени, и синтез наблюдателя ее переменных состояния с применением модального регулятора:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) \neq 0; \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где A — $(n \times n)$ -мерная матрица состояния размерности;

B — $(n \times k)$ -мерная матрица входа, а при наличии одного входа — $(n \times 1)$;

C — $(r \times n)$ -мерная матрица выхода;

$x(t)$ — $(n \times 1)$ -мерный вектор фазовых координат (переменных состояния);

$u(t)$ и $y(t)$ — векторы входа и выхода размерности, соответственно, $(1 \times n)$ и $(r \times 1)$.

Предположим, что в силу разных причин возникла ситуация, когда получение достоверной информации о состоянии объекта управления производится не по всем компонентам вектора состояния, а лишь по некоторым его переменным, т. е. выполняется неравенство $r < n$. Тогда задача оценки вектора состояния полной размерности не может быть решена без восстановления его недостающих фазовых координат, оценка которых возможна с применением динамических наблюдателей, в которых восстановление неизмеряемых переменных состояния производится по измеряемым векторам выхода и управления. Такие наблюдатели строятся на основе пространственной модели объекта управления, выполненной в формате матричного условия Луенбергера, что значительно упрощает синтез модального Аккермана и оценку его параметров в замкнутой системе.

Из уравнения (1) следует, что при условии $u(t) = 0$ искомый вектор переменных состояния системы может быть найден посредством матричного экспоненциала $x(t) = e^{At}x(0)$ для всех его фазовых координат. Аналогично определяется вектор состояния динамического наблюдателя, в уравнении состояния которого учтены составляющие, образуемые его входами $x(t)$ и $u(t)$:

$$\dot{z}(t) = Fz(t) + Hx(t) + TBu(t), \quad (2)$$

где F и H — матрицы наблюдателя, подлежащие определению; T — матрица преобразования, обеспечивающая линейную связь между векторами состояния наблюдателя $z(t)$ и объекта $x(t)$.

При отсутствующем сигнале управления модель (2) динамического наблюдателя преобразуется к виду

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + Hx(t); \\ \hat{y}(t) = Cz(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $\hat{y}(t)$ — вектор выхода наблюдателя, являющийся оценкой вектора выхода объекта управления.

Для того чтобы из уравнения (2) следовало однозначное соответствие $z(t) = Tx(t)$ между векторами $z(t)$ и $x(t)$, для всех $t \geq 0$ должно выполняться условие Луенбергера, выраженное матричным уравнением [4]:

$$TA - FT = H. \quad (4)$$

Данное линейное уравнение имеет однозначное решение относительно T при отсутствии общих собственных чисел в спектрах матриц A и F .

При синтезе наблюдателей, в первую очередь, возникают вопросы: как поведет себя переходный процесс в наблюдателе относительно переходного процесса в системе при наличии и отсутствии информации о начальных условиях векторов состояния системы и наблюдателя, и не будет ли потеря информации о ее текущих переменных.

Сначала убедимся в том, что наблюдаемыми переменными состояния будут все их текущие значения на всем временном интервале $t \geq 0$, когда векторы начальных условий системы и наблюдателя известны и совпадают. Действительно, если в разности производных векторов состояния $z(t)$ из уравнения (2) и его преобразованного эквивалента $T\dot{x}(t)$ при $u(t) = 0$:

$$\dot{z}(t) - T\dot{x}(t) = Fz(t) + (H - TA) \cdot x(t), \quad (5)$$

заменить матрицу H ее эквивалентом из условия (4), то получим

$$\dot{z}(t) - T\dot{x}(t) = F[z(t) - Tx(t)]. \quad (6)$$

Отсюда следует, что из условия равенства начальных условий: $z(0) = Tx(0)$, имеем

$$\dot{z}(t) = T\dot{x}(t), \quad (7)$$

что доказывает истинность утверждения о наблюдаемости переменных состояния на всем временном интервале и отсутствии потерь информации о текущих значениях переменных.

Теперь покажем, что наблюдаемость системы сохранится также в случае отсутствия информации о начальных условиях системы или наблюдателя, т. е. при $z(0) \neq Tx(0)$. С этой целью введем вектор ошибки вида

$$\varepsilon(t) = z(t) - Tx(t).$$

Тогда уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}(t) = F \cdot \varepsilon(t). \quad (8)$$

Вновь применив матричный экспоненциал, но теперь к вектору ошибки $\varepsilon(t)$, получим для него искомое решение:

$$\varepsilon(t) = e^{Ft}[z(0) - Tx(0)] = e^{Ft}\varepsilon(0). \quad (9)$$

Отсюда получим и переходный процесс в системе с наблюдателем:

$$z(t) = Tx(t) + e^{Ft}\varepsilon(0). \quad (10)$$

Как видно из полученного равенства, выбором собственных чисел матрицы F можно обеспечить в наблюдателе более быстрое, чем в системе (1), завершение переходного процесса, что является необходимым условием для уменьшения динамической ошибки системы (3). В результате в равен-

стве (10) на интервале $t \geq t_p$ получим практически равное нулю второе слагаемое и подтверждение того, что $z(t) \approx Tx(t)$. Таким образом, доказано, что и при ненулевых начальных условиях системы (1) и наблюдателя (3) переходный процесс в наблюдателе асимптотически сходится к переходному процессу в управляемой системе на интервале $t \geq t_p$, т. е. наблюдаемость системы обеспечивается.

Рассмотрим возможность наблюдения переменных состояния в системе (1) с входом $u(t) \neq 0$. С этой целью вычтем из уравнения динамического наблюдателя (2) уравнение (1), умноженное на матрицу T слева. В результате получим выражение

$$\dot{z}(t) - T\dot{x}(t) = Fz(t) + (H - TA)x(t) + (TB - TV)u(t), \quad (11)$$

которое, по существу, повторяет (5).

Из соотношения (11) следует, что в замкнутой системе с наблюдателем в результате компенсации ошибки измерений переходный процесс в наблюдателе инвариантен по отношению к сигналу $u(t)$, что позволяет выполнить синтез наблюдателя с нулевым входом, обобщив затем результаты моделирования в системе с ненулевым входом управления.

Если в наблюдателе необходимо получить $z(t) = x(t)$, то матрица T должна быть равна единичной матрице I , т. е. $T = I$. В этом случае, как следует из (4), размерность модели наблюдателя будет равна размерности системы:

$$F = A - H. \quad (12)$$

Динамику судна, как и любого сложного динамического объекта, можно описать дифференциальным уравнением высокого порядка, решение которого требует многократного интегрирования, что является сложной и трудоемкой операцией даже при использовании современных вычислительных средств. В связи с этим для решения практических задач оценивания переменных состояния динамики судна применяют математические модели уравнений динамики в форме пространства состояний, в котором нелинейная дифференциальная модель [10], [11] приводится к системе линейных дифференциальных уравнений первого порядка, число которых равно наивысшему порядку производной в исходной модели. В этом случае для поиска решений применяют отлично развитый и отлаженный аппарат численных методов на основе векторно-матричного анализа из инструментов с применением технологий линейных матричных неравенств и новых приложений вычислительной среды MATLAB [12].

Выполним синтез наблюдателя как устройства в дополнение к авторулевому на примере наблюдаемого объекта — танкера [13], [14] с известной моделью динамики в пространстве состояний в форме (1), в которой матрицы A и B представим соотношениями [15]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Такой наблюдатель может быть применим для восстановления переменных вектора состояния при неполных измерениях в случае изменения условий плавания и воздействия различных факторов (волнения, ветра и др.), что позволит в итоге осуществить автоматическую коррекцию параметров его авторулевого на курсе. С использованием алгоритма модального управления оценим параметры регулятора путем выбора желаемого вида переходного процесса. Выберем собственные значения матрицы замкнутой системы и используя уравнение Аккермана, найдем параметры регулятора, обеспечивающего требуемые динамические свойства замкнутой системы.

Элементы матриц A и B модели рассматриваемого судна — танкера дедвейтом 250 тыс. т, структурно представленные в (13), имеют значения [12]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -0.01306; a_{12} = -8.639; a_{13} = 0; \\ a_{21} &= -0.00009309; a_{22} = -0.04314; a_{23} = 0; \\ a_{31} &= 0; a_{32} = 1; a_{33} = 0. \\ b_1 &= 0.07037; b_2 = -0.0004592; b_3 = 0. \end{aligned}$$

Объект управления без регулятора неустойчив, поскольку собственные значения матрицы A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

содержат положительное число и нуль, которые можно определить с помощью функции

`eig(A)`

`ans =`

0

-0.060199939408042

0.003999939408043

Проверка свойств управляемости и наблюдаемости позволяет приступить к синтезу системы с регулятором выхода и динамическим наблюдателем, предназначенными для восстановления переменных состояния. При этом становятся достижимыми заданные показатели устойчивости и реализуются режимы работы исполнительных механизмов с низким потреблением энергии на управление. В результате матрица замкнутой системы A_3 , содержащая обратную связь по переменным состояния, согласно структуре (13), корректируется с помощью элементов матрицы регулятора k_1, k_2, k_3 и имеет вид:

$$A_3 = A - BK = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1 k_1 & a_{12} - b_1 k_2 & -b_1 k_3 \\ a_{21} - b_2 k_1 & a_{22} - b_2 k_2 & -b_2 k_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

На основании данных машинного эксперимента для модели танкера зададимся следующими собственными числами матрицы A_3 замкнутой системы:

$$\lambda_1 = -0.05704; \lambda_2 = -0.01988 + i \cdot 0.014217, \lambda_3 = -0.01988 \pm i \cdot 0.014217.$$

Из значений этих чисел сформируем вектор-столбец желаемых полюсов замкнутой системы:

$$P = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T,$$

который служит одним из аргументов операторной функции $acker(A, B, P)$, обеспечивающей вычисление в среде MATLAB вектора искомых коэффициентов K по формуле Аккермана.

В результате применения этой функции получим следующие значения коэффициентов усиления модального регулятора:

$$K = [0.1476 \text{--} 65.7976 \text{--} 2.7154].$$

С учетом численных значений вектора K матрица A_3 замкнутой регулятором управляемой системы примет вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.0234 & -4.0088 & 0.1911 \\ -0.0000 & -0.0734 & -0.0012 \\ 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}.$$

Воспользовавшись функцией $eig(A_3)$, можно получить ранее выбранные значения полюсов вектора P .

Далее приступим к синтезу наблюдателя Луенбергера, обеспечивающего возможность восстановления переменных вектора состояния при неполных измерениях, когда размерность вектора выхода $y(t)$ равна $(r \times 1)$, где $r < n$. В этом случае модель наблюдателя со входом сигнала невязки между выходами объекта и наблюдателя (при нулевом входе управления) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + N[(y(t) - \hat{y}(t))] = Az(t) + Ny(t) - NCz(t) = \\ &= (A - NC) \cdot z(t) + Ny(t) = Fz(t) + Ny(t), \end{aligned}$$

где N — вектор коэффициентов усиления (настройки) наблюдателя.

С учетом условия $z(t) = x(t)$, согласно (12), матрица $H = NC$ является составной. Первый сомножитель в правой части содержит элементы, которые можно корректировать. Структура матрицы (вектора) C сохраняется жесткой. Поэтому при формировании матрицы состояния наблюдателя по уравнению

$$F = A - NC \quad (14)$$

допустимы различные способы задания N , что объясняется неоднозначностью соотношений между элементами матриц и их спектрами.

В работе синтезирован наблюдатель переменных состояния для судна при измерении одной из трех переменных состояния, для чего матрица (вектор-строка) C представлена тремя компонентами, входящими в уравнение (19), которые имеют вид:

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0], C_2 = [0 \ 1 \ 0], C_3 = [0 \ 0 \ 1],$$

что позволило поэтапно рассмотреть возможности наблюдения текущих значений переменных состояния судовой системы управления по измерениям, выполняемым по приведенным векторам выхода. Изменения в структуре обобщенной системы уравнений в пространстве состояний, соответствующей динамике комплекса «управляемый объект — наблюдатель», происходят только в блоке, определяющем связь между объектом и наблюдателем, которая зависит от контролируемого вектора выхода.

На структуру N в матрице наблюдателя (14) необходимо ввести ограничения, состоящие в исключении кратности корней характеристического уравнения наблюдателя. Действительные составляющие корней наблюдателя должны иметь значения, при которых время переходного процесса в наблюдателе должно быть существенно меньше этого показателя в наблюдаемом объекте. Следует также учитывать, что с увеличением быстродействия наблюдателя как динамической системы возрастает нагрузка на ее силовые компоненты, возникают большие амплитуды сигналов и др. В этой связи выбор численных значений параметров наблюдателя целесообразно выбирать используя оценки, выполняемые с введением показателя устойчивости в матричные неравенства Ляпунова, по которым определяется регулятор.

Остановимся на формировании стабилизирующей части N матрицы наблюдателя, которая в формате (C_1, C_2, C_3) принимает последовательно значения

$$N_1 = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T, N_2 = [n_4 \ n_5 \ n_6]^T, N_3 = [n_7 \ n_8 \ n_9]^T,$$

где T — знак транспонирования.

С помощью функций *Symbolic Toolbox* находим:

$$F_1 = \begin{bmatrix} a_{11} - n_1 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} - n_2 & a_{22} & a_{23} \\ -n_3 & 1 & 0 \end{bmatrix}; F_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} - n_4 & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - n_5 & a_{23} \\ 0 & 1 - n_6 & 0 \end{bmatrix}; F_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} - n_7 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} - n_8 \\ 0 & 1 & -n_9 \end{bmatrix}.$$

Следуя изложенным рекомендациям по выбору собственных значений матриц F_1, F_2 и F_3 , а также исключая варианты возможного совпадения корней полиномов наблюдаемой системы и наблюдателя, остановимся на следующих значениях:

$$L = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T = [-0.06 \ -0.05 \ -0.04]^T.$$

Для обеспечения желаемого распределения корней (собственных чисел матриц F) наблюдателя выберем форму характеристического полинома вида

$$D = (s - l_1) \cdot (s - l_2) \cdot (s - l_3) = s^3 + 0.15 \cdot s^2 + 0.074 \cdot s + 0.00012. \quad (15)$$

Заметим, что коэффициенты полинома рассматриваемой системы полностью определены. Полиномы наблюдателей F_1, F_2 и F_3 обозначим, соответственно, символами Z_1, Z_2 и Z_3 . Согласно принятым обозначениям, матрице F_1 соответствует характеристический полином

$$Z_1 = s^3 + d_{11} \cdot s^2 + d_{12} \cdot s + d_{13},$$

где $d_{11} = n_1 - a_{22} - a_{11}$;

$$d_{12} = a_{11} \cdot a_{22} - a_{23} - a_{12} \cdot a_{21} + a_{12} \cdot n_2 + a_{13} \cdot n_3 - a_{22} \cdot n_1;$$

$$d_{13} = a_{11} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{21} + a_{13} \cdot n_2 - a_{23} \cdot n_1 + a_{12} \cdot a_{23} \cdot n_3 - a_{13} \cdot a_{22} \cdot n_3.$$

Матрице F_2 соответствует полином

$$Z_2 = s^3 + d_{21} \cdot s^2 + d_{22} \cdot s + d_{23},$$

где $d_{21} = n_5 - a_{22} - a_{11}$;

$$d_{22} = a_{11} \cdot a_{22} - a_{23} - a_{12} \cdot a_{21} + a_{11} \cdot n_5 + a_{21} \cdot n_4 - a_{23} \cdot n_6;$$

$$d_{23} = a_{11} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot a_{23} \cdot n_6 + a_{13} \cdot a_{21} \cdot n_6.$$

Матрице F_3 соответствует полином

$$Z_3 = s^3 + d_{31} \cdot s^2 + d_{32} \cdot s + d_{33},$$

где $d_{31} = n_9 - a_{22} - a_{11}$;

$$d_{32} = n_8 - a_{23} + a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot n_9 - a_{22} \cdot n_9;$$

$$d_{33} = a_{11} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot n_8 + a_{21} \cdot n_7 + a_{11} \cdot a_{22} \cdot n_9 - a_{12} \cdot a_{21} \cdot n_9.$$

Последовательно приравняв коэффициенты каждого характеристического полинома наблюдателя, начиная с Z_1 , с известным коэффициентом его желаемой формы (15) при одинаковых степенях s , можно получить неизвестные значения элементов вектора N .

Приведем решение для N_1 наблюдателя с измерителем $C_1 = [1 \ 0 \ 0]$:

$$N_1 = [n_1 \ n_2 \ n_3] = [0.0532 \ -0.0001 \ 0.0018].$$

Полученное аналогично решение для измеряемой второй координаты имеет вид:

$$N_2 = [n_4 \ n_5 \ n_6] = [5.6419 \ 0.0532 \ -2.5219].$$

С учетом Z_3 для измерения третьей координаты определим численные значения элементов вектора N_3 :

$$N_3 = [n_7 \ n_8 \ n_9] = [-0.5629 \ -0.0006 \ 0.0532].$$

Матрицы наблюдателей, соответствующие (14), имеют вид:

$$F_1 = A_3 - N_1^T C_1;$$

$$F_2 = A_3 - N_2^T C_2;$$

$$N_3 = A_3 - N_3^T C_3.$$

Моделирование системы удобно выполнять по обобщенной модели объекта и наблюдателя, матрица которой S_j состоит из блоков:

$$S_j = \begin{bmatrix} A_3 & 0_{3 \times 3} \\ N_j^T C_j & F_j \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $j = 1, 2, 3$.

Применительно к наблюдаемому объекту с матрицей A размерности (3×3) блоки, определяющие устойчивость системы, представлены в диагонали матрицами замкнутой системы A_3 и наблюдателя F_j . Параметры наблюдателей размещены в столбцах левого нижнего блока. Этот блок состоит из трех столбцов, один из которых с ненулевыми элементами. Блочная структура способствует повышению эффективности моделирования и визуализации расчетов, а также исследованию режимов наблюдения с введением запаздывания при управлении наблюдателем и объектом, формированию траекторий с эквидистантными характеристиками при дистанционном групповом управлении подвижными объектами.

Для моделирования применен формат построения LTI -объектов, что позволило использовать инструменты исследований в MATLAB динамики системы во временной и частотной областях, вы-

полнять эквивалентные по динамическим свойствам переходы к передаточным функциям, а также совершенствовать процесс синтеза инвариантных во времени наблюдателей и др.

Моделирование выполнено для следующих численных значений блочных матриц:

$$B_1 = [0 \ 0 \ 0.425 \ 0 \ 0 \ 0.425]^T; C_1 = \text{eye}(6); D_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$\text{sys}L_j = \text{ss}(S_j, B, C_1, D_1).$$

Для удобства наблюдений введен вектор переменных состояния обобщенной системы:

$$v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6]^T,$$

где v_1, v_2, v_3 — переменные состояния наблюдаемого объекта; v_4, v_5, v_6 — переменные состояния наблюдателя.

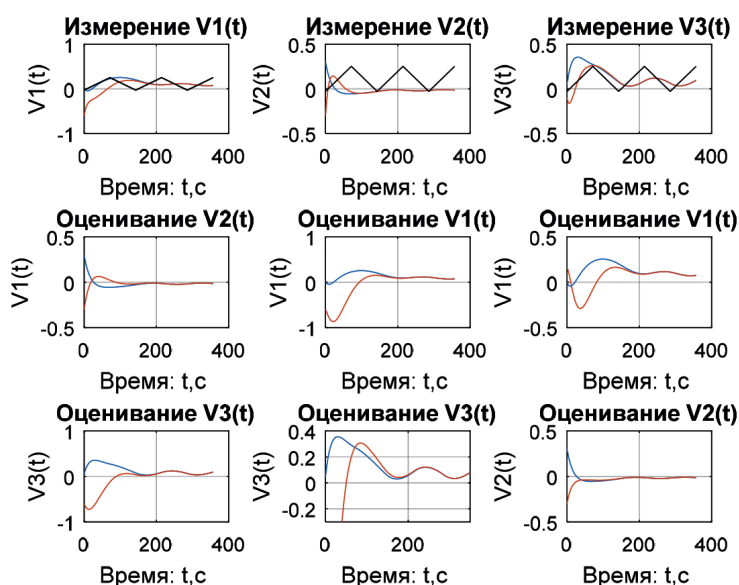
Задан вектор начальных условий обобщенной модели:

$$v_0 = [v_{01} \ v_{02} \ v_{03} \ v_{04} \ v_{05} \ v_{06}].$$

Для расчетов наблюдателей судовых систем применены способы модального синтеза.

Результаты (Results)

Решения в графической форме, подтверждающие корректность предложенных решений, приведены на рисунке. Моделирование переходных процессов в обобщенных системах S_1, S_2, S_3 при различных начальных условиях выполнено при входном сигнале треугольной формы. Вектора начальных условий задаются так, чтобы можно было увидеть на графиках переходные процессы в обобщенных системах и, в частности, оценить время переходного процесса в наблюдателях.



Графики траекторий свободного движения (динамики)
системы управления судна
под действием различных начальных условий

Графики траекторий, приведенных в первом столбце рисунка, получены при измерении переменной состояния $v_1(t)$ и восстановлении недостающих координат $v_2(t)$ и $v_3(t)$. Аналогичные графики во втором столбце рисунка получены при измерении переменной состояния $v_2(t)$ и восстановлении недостающих координат $v_1(t)$ и $v_3(t)$ и, наконец, графики в третьем столбце рисунка получены при измерении переменной состояния $v_3(t)$ с восстановлением недостающих координат $v_1(t)$ и $v_2(t)$.

Обсуждение (Discussion)

Вектор начальных условий:

$$v_{01} = [0 \ 0.003 \ 0.005 - 0.6 - 0.003 \ 0.06]^T.$$

Из графиков, приведенных на рисунке, видно, что переходный процесс в наблюдателе при измерении $v_1(t)$ практически завершается за время $t_p \leq 200$ с, а также, что при измерении $v_2(t)$ в обобщенной системе (16) с матрицей S_2 и векторе начальных условий

$$v_{02} = [0 \ 0.003 \ 0.005 - 0.6 - 0.003 \ 0.06]^T$$

время переходного процесса t_p в наблюдателе составляет не более 200 с.

Аналогично в системе S_3 при векторе начальных условий

$$v_{03} = [0 \ 0.003 \ 0.005 \ 0.150 - 0.003 - 0.010]^T.$$

Оценка времени переходного процесса в системе с наблюдателем составила 210 с, что определяется инерционными свойствами супертанкера.

Заключение (Conclusion)

Метод синтеза наблюдателя, основанный на выборе собственных значений матрицы его состояния, является простым и мощным средством повышения эффективности контроля и управления судовыми энергетическими комплексами. Если динамический объект отвечает требованиям наблюдаемости и управляемости, то допустимая многовариантность выбора собственных значений наблюдателя позволяет синтезировать динамическую систему, отвечающую требованиям быстродействия и экономии энергии на управление. Поскольку при подключении наблюдателя динамическая система становится обобщенной, проектирование производят в два этапа. На первом этапе определяют параметры регулятора наблюдаемого объекта, устанавливаемого в цепи обратной связи, и обеспечивают минимизацию выбранного критерия качества, для чего применяют формулу Аккермана. На втором этапе определяют коэффициент усиления наблюдателя с выбранным расположением корней характеристического уравнения. При выборе спектра матрицы состояния наблюдателя следует иметь в виду, что быстрый отклик сопровождается возрастанием чувствительности к помехам и шумам. Поэтому, на основании компромиссных решений, спектр матрицы состояния наблюдателя следует выбирать так, чтобы переходный процесс в наблюдателе завершался существенно быстрее, чем в объекте, причем меньшее значение необходимо выбирать при сильно зашумленных сигналах.

Применение наблюдателей на объектах водного транспорта в условиях цифровой трансформации приобретает особую актуальность в связи переходом к дистанционному управлению подвижными объектами, что определяется как новыми формами диагностики и контроля, так и возможностью обеспечения группового управления с получением эквидистантных и других траекторий движения каждого элемента, принадлежащего множеству группы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perez T. Ship motion control: Course keeping and roll stabilization using rudder and fins / T. Perez. — Springer-Verlag London Limited, 2005. — 321 p.
2. Сахаров В. В. Модальный синтез оценщика неизмеряемых переменных состояния для системы стабилизации курса судна / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Я. Н. Каск // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2022. — № 4. — С. 7–17. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-4-7-17.
3. Чертков А. А. Модальный синтез наблюдателя переменных состояния системы автоматизации речного землесоса / А. А. Чертков, В. Ю. Иванюк, Я. Н. Каск // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 787–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-787-797.

4. Сазонов А. Е. Модальный метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна / А. Е. Сазонов, В. В. Сахаров, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.
5. Lewis F. L. Optimal Control. / F. L. Lewis, D. Vrabie, V. L. Syrmos. — 3rd Edition. — John Wiley and Sons, Inc., 2012. — 552 p.
6. Witkowska A. Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method / A. Witkowska, R. Smierzchalski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2012. — Vol. 22. — No. 4. — Pp. 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
7. Pang C. K. Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic systems / C. K. Pang, F. L. Lewis, T. H. Lee // Transactions of the Institute of Measurement and Control. — 2010. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 137–154. DOI: 10.1177/0142331209339868.
8. Dhaliwal S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems: Master thesis / S. S. Dhaliwal. — Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011. — 83 p.
9. Гринкевич Я. М. Наблюдатели и оценщики состояния в судовых системах управления / Я. М. Гринкевич, В. В. Сахаров. — СПб.: СПГУВК, 2001. — 193 с.
10. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
11. Агарков С. А. Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления / С. А. Агарков, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 7–11.
12. Веремей Е. И. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е. И. Веремей, В. М. Корчанов, М. В. Коровкин, С. В. Погожев. — СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2002. — 370 с.
13. Гофман А. Д. Динамика корабля / А. Д. Гофман. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 150 с.
14. Садков А. В. Моделирование динамики водоизмещающего речного судна, неустойчивого на курсе / А. В. Садков // Морской Вестник. — 2012. — № 3 (43). — С. 94–96.
15. Reid R. E. Design of the steering controller of a supertanker using linear quadratic control theory: A feasibility study / R. E. Reid, B. C. Mears // 1981 20th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes. — IEEE, 1981. — Pp. 181–187. DOI: 10.1109/CDC.1981.269493.

REFERENCES

1. Perez, Tristan. *Ship motion control: Course keeping and roll stabilization using rudder and fins*. Springer-Verlag London Limited, 2005.
2. Saharov, V. V., A. A. Chertkov, and Ya. N. Kask. “Modal synthesis of estimator of unmeasured state variables for ship course stabilization system.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 4 (2022): 7–17. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-4-7-17/
3. Chertkov, Alexandr A., Vladimir Yu. Ivanyuk, and Yaroslav N. Kask. “Modal synthesis of the observer of the state variables of the river dredger automation system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 787–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-787-797.
4. Sazonov, A. E., V. V. Saharov, and A. A. Chertkov. “A modal method for the synthesis of an observer for heading control.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.
5. Lewis, Frank L., Draguna Vrabie, and Vassilis L. Syrmos. *Optimal Control*. 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc., 2012.
6. Witkowska, Anna, and Roman Śmierchalski. “Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.4 (2012): 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
7. Pang, Chee Khiang, Frank L. Lewis, and Tong Heng Lee. “Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic systems.” *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 32.2 (2010): 137–154. DOI: 10.1177/0142331209339868.
8. Dhaliwal, S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems. Master thesis. Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011.

9. Grinkevich, Ya.M., and V. V. Sakharov. *Nablyudateli i otsenivateli sostoyaniya v sudovykh sistemakh upravleniya*. SPb.: SPGUVK, 2001.
10. Tomera, Mirosław. "Nonlinear controller design of a ship autopilot." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
11. Agarkov, S.A., and S. V. Pashentsev. "Parametric identification of the Nomoto generalized model using the apparatus of variational calculus." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 7–11.
12. Veremey, E.I., V. M. Korchanov, M. V. Korovkin, and S. V. Pogojev. *Kompjuternoe modelirovanie sistem upravleniya dvizheniem morskikh podvijnykh ob'ektov*. SPb.: NII Himii SPbGU, 2002.
13. Gofman, A. D. *Dinamika korablja*. SPb.: Izd-vo SPGUWK, 2003.
14. Sadkov, A.V. "Modelirovanie dinamiki vodoizmešajušego rechnogo sudna, neustoychivogo na kurse." *Morskoy Vestnik* 3(43) (2012): 94–96.
15. Reid, Robert E., and Barry C. Mears. "Design of the steering controller of a supertanker using linear quadratic control theory: A feasibility study." *1981 20th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*. IEEE, 1981. DOI: 10.1109/CDC.1981.269493.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Каск Ярослав Николаевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Иванюк Владимир Юрьевич — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov, Alexandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Kask, Yaroslav N. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Ivanyuk, Vladimir Yu. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2023 г.
Received: September 22, 2023.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 15. № 5

2023 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.10.23. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 25. Тираж 500 экз. Заказ № 623/23

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7