

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. № 6

**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. — № 6. — 214 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 923**

Подпорин С. А., Холопцев А. В. Тенденции изменения средней
толщины ледяного покрова, уровня и поверхностной солёности вод
моря Лаптевых в зимне-весенний период при дальнейшем
потеплении климата 923

Смоленцев С. В., Филяков А. Е., Исаков Д. В. Адаптивный
динамический домен безопасности для различных условий плавания 932

Васьков А. С., Мироненко А. А. Комбинации изолиний пеленгов
и дистанций пары навигационных ориентиров для определения
обсервованного места судна 941

Кузнецов А. Л. Модификация волнового алгоритма для расчета
эвклидовых расстояний в транспортных задачах 951

Алексеев Д. В., Лентарёв А. А. Статистический анализ разливов
нефти и нефтепродуктов на море 959

Моргунов К. П., Ивановский Ю. К., Богатырёв В. Г. Лабораторные
исследования процессов размыва и намыва грунта в районе
размещения мостовых опор 971

Онищенко И. С., Черейский И. З., Гуляев И. А. Требования
к эксплуатации судов при перевозке крупногабаритных
тяжеловесных грузов 987

Ююкин И. В. Проблема реализации концепции максимального
интегрирования разнородных данных в практической навигации 998

Жидкова А. М. Моделирование работы барже-буксирных составов
методом матричной маршрутизации 1015

Киджи Д. С., Ольховик Е. О. Методика районирования
акватории Северного морского пути при проведении
аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти 1030

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 1041**

Красюк А. Б., Чистов В. Б., Никифоров В. Г. Надежность элементов
корпусов судов речного флота 1041

Сухотерин М. В., Сосновская А. А., Пижурин Н. Ф. Устойчивость
прямоугольных элементов судовых конструкций при чистом сдвиге 1054

Ушаков К. М., Яцук Ю. В. Экспериментальное исследование курсовой
устойчивости модели буксируемой баржи 1066

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) 1076

Лебедева Е. Г. Обеспечение бескавитационного режима при промывке
судовых трубопроводов двухфазной смесью 1076

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ 1085

Барышников С. О., Вихров Н. М., Сахаров В. В. Синтез оптимальных
регуляторов судовых систем на основе матричных неравенств 1085

Чертков А. А., Сабуров С. В., Каск Я. Н. Алгоритм идентификации
параметров моделей производственных функций при помощи
нейронной сети 1096

Ястребов И. М. Управление рисками при разработке программного
обеспечения в области защиты информации 1105

Буцанец А. А., Ксенофонтов Н. М., Волкова Т. А. Исследование
проблемы построения автоматизированной системы управления
для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов
через судоходные шлюзы 1115

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY.....923

Podporin S. A., Kholoptsev A. V. Change trends of mean ice thickness, water level, and surface salinity in the Laptev sea in winter-spring period under further climate warming conditions.....923

Smolentsev S. V., Filyakov A. E., Isakov D. V. Adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions.....932

Vas'kov A. S., Mironenko A. A. The bearings and distances isolines combinations of the navigational landmarks pair for the vessel fixed position determination941

Kuznetsov A. L. Modification of the wave algorithm for Euclidean distances calculation in transport applications.....951

Alekseev D. V., Lentarev A. A. Statistical analysis of oil and oil product spills at sea.....959

Morgunov K. P., Ivanovsky Yu. K., Bogatyrev V. G. Laboratory studies of the soil erosion and alluvium processes in the area of bridge supports971

Onishchenko I. S., Chereysky I. Z., Gulyaev I. A. Requirements for the vessels operation at heavy-lift cargoes carriage987

Yuyukin I. V. The problem of implementing the concept of maximum integration of heterogeneous data in practical navigation998

Zhidkova A. M. Simulation of the barge-tug combinations operation using the matrix routing method1015

Kidzhi D. S., Ol'khovik E. O. Methodology for zoning the Northern Sea Route water area during salvage and rescue operations and oil spill response.....1030

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION.....1041

Krasiuk A. B., Chistov V. B., Nikifirov V. G. Reliability of river fleet vessels hull elements.....1041

Sukhoterlin M. V., Sosnovskaya A. A., Pizhurina N. F. Shear buckling of ship structures rectangular elements.....1054

Ushakov K. M., Yatsuk Yu. V. Experimental study on the course stability of a towed barge model.....1066

Volume 15. № 6

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

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	1076
<i>Lebedeva E. G.</i> Providing a cavitation-free regime when flushing ship pipelines with a two-phase mixture	1076
AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	1085
<i>Baryshnikov S. O., Vikhrov N. M., Sakharov V. V.</i> Synthesis of ship systems optimal regulators based on matrix inequalities.....	1085
<i>Chertkov A. A., Saburov S. V., Kask Ya. N.</i> Algorithm for identifying parameters of production function models using a neural network	1096
<i>Yastrebov I. M.</i> Risk management in software development in the field of information protection	1105
<i>Butsanets A. A., Ksenofontov N. M., Volkova T. A.</i> Studying the problem of constructing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels through shipping locks.....	1115

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931

CHANGE TRENDS OF MEAN ICE THICKNESS, WATER LEVEL, AND SURFACE SALINITY IN THE LAPTEV SEA IN WINTER-SPRING PERIOD UNDER FURTHER CLIMATE WARMING CONDITIONS

S. A. Podporin, A. V. Kholoptsev

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

The purpose of the paper is to identify the most likely trends in interannual changes of the ice cover thickness on sections of the Northern Sea Route in the Laptev Sea in the winter-spring months under conditions of further climate warming. A hypothesis that in the modern period such changes can be significantly impacted by melting of submarine permafrost layers located inside the sea shelf, — a process caused by their heat exchange with bottom sea waters, is put forward. To verify the hypothesis, trends in interannual changes in ice thickness are compared with trends in variations in sea level and surface salinity. As factual material, data from the global reanalysis GLORYS12v1 is used. The research methodology is based on the standard methods of mathematical statistics. A correlation between the trends of the above processes has been found. It allows us to confirm the hypothesis put forward. The results obtained indicate that, under the conditions of ongoing climate warming, there remains a high probability that the average thickness of the ice cover will not decrease, and the ice situation in the Laptev Sea in the winter-spring months will not improve significantly. The latter confirms the need and feasibility of further development of the Russian icebreaker fleet.

Keywords: Laptev Sea, Northern Sea Route, shipping, ice conditions, ice thickness, salinity, sea level, climate warming, trend.

For citation:

Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Change trends of mean ice thickness, water level, and surface salinity in the Laptev Sea in winter-spring period under further climate warming conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 923–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931.

УДК 656.61.052: 551.583

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА, УРОВНЯ И ПОВЕРХНОСТНОЙ СОЛЕННОСТИ ВОД МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ЗИМНЕ-ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД ПРИ ДАЛЬНЕЙШЕМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

С. А. Подпорин, А. В. Холопцев

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

В работе выполнено исследование проблемы выявления наиболее вероятных тенденций ледовой обстановки и ее изменений в период зимне-весенней навигации при различных сценариях дальнейших перемен климата, актуальной для физической географии, климатологии, развития и обеспечения безопасности судоходства. Целью статьи является выявление наиболее вероятных тенденций межгодовых изменений толщины ледяного покрова на участках маршрутов Северного морского пути в море Лаптевых в зимне-весенние месяцы в условиях дальнейшего потепления климата. Выдвинута гипотеза о том, что в современном периоде на такие изменения может оказывать значительное влияние процесс таяния присутствующих в недрах шельфа многолетнемерзлых пород, вызванный их теплообменом с морскими придонными водами.

Для проверки указанной гипотезы сопоставлены тенденции межгодовых изменений толщины ледяного покрова моря Лаптевых с тенденциями вариаций его уровня и поверхностной солёности. В качестве фактического материала использованы данные глобального реанализа GLORYS12v1. Методика исследования основана на применении стандартных методов математической статистики. Между тенденциями указанных процессов выявлено соответствие, что позволяет подтвердить выдвинутую гипотезу. Отмечается, что одним из факторов, способствующих сохранению сложной ледовой обстановки в море Лаптевых, может являться глобальное потепление климата, которое ускорило процесс таяния субмаринных толщ многолетнемерзлых пород на его шельфе и вызвало опреснение его поверхностных вод. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях происходящего потепления климата высокой остается вероятность того, что средняя толщина ледяного покрова не будет снижаться, а ледовая обстановка в море Лаптевых в зимне-весенние месяцы существенно не улучшится. Последнее подтверждает необходимость и целесообразность дальнейшего развития ледокольного флота России.

Ключевые слова: море Лаптевых, Северный морской путь, судоходство, ледовые условия, толщина льда, солёность, уровень моря, потепление климата, тенденция.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Тенденции изменения средней толщины ледяного покрова, уровня и поверхностной солёности вод моря Лаптевых в зимне-весенний период при дальнейшем потеплении климата / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 923–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931.

Введение (Introduction)

Одним из приоритетов Российской Федерации в Арктике является дальнейшее развитие судоходства по Северному морскому пути (далее — СМП)¹. Основным препятствующим этому фактором является ледовая обстановка, которая в зимне-весенние месяцы на большинстве его участков отличается повышенной сложностью. В связи с этим выявление наиболее вероятных тенденций ее изменения в периоды зимне-весенней навигации при различных сценариях дальнейших перемен климата является актуальной проблемой физической географии, климатологии и безопасности судоходства.

Наибольший интерес решение указанной проблемы представляет для районов СМП, характеризующихся особенно суровым климатом и повышенной ледовитостью. К ним, в частности, относятся районы № 11–17, расположенные в море Лаптевых², в которых сплоченность ледяного покрова в зимне-весенние месяцы достигает 10 баллов, а его средняя толщина превышает 1,5 м [1]. Актуальность круглогодичной навигации в море Лаптевых в настоящее время возрастает [2]. Так, за последние пять лет в зимне-весенний сезон был выполнен ряд пробных транзитных рейсов танкерами класса Ямалмакс в январе-феврале, а также мае [3], [4]. Их целью являлась оценка возможности разумного расширения временных рамок навигационного периода на СМП. Было продемонстрировано, что навигация в эти месяцы судами такого типа в принципе осуществима, однако несет высокие риски не только из-за тяжелой ледовой обстановки, но и ввиду недостаточности оперативного гидрометеорологического и гидрографического обеспечения [5].

Вопросы дальнейшего развития судоходства в восточных морях российской Арктики в зимне-весенний период достаточно часто исследуются в профильных научных периодических изданиях. Так, в работе [4] проанализированы вопросы соответствия технических характеристик современных судов ледового класса Arc7 фактически существующим условиям зимне-весенней навигации в море Лаптевых, а в работе [6] дополнительно отмечается, что безопасное плавание в этот период возможно только при должном и своевременном учете состояния и расположения запирающих полыней и ледовых массивов.

¹ План развития Северного морского пути до 2035 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/news/46171> (дата обращения: 10.10.2023).

² Правила плавания в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya/f137.html (дата обращения: 20.10.2023).

Согласно существующим представлениям о тенденциях изменения характеристик ледяного покрова арктических морей в период современного потепления климата (с конца 70-х гг. XX в. и до настоящего времени), их среднемесячные значения повсеместно снижались [7]–[9]. Вместе с тем в источниках [10], [11] показано, что в период 2012–2020 гг. в Сибирском и Дальневосточном секторах Арктики, включающих акваторию моря Лаптевых, в летние месяцы прекратилось снижение суммарной площади и объема ледяного покрова и началось их увеличение. Причины этого феномена, обнаруженного также в некоторых других арктических морях в другие сезоны, до конца не выяснены, что не позволяет учитывать их при ориентировочном прогнозировании характеристик ледяного покрова (и прежде всего толщины льда) на водных путях российской Арктики. В связи с этим авторами данной работы (*Прим. ред.*) была выдвинута гипотеза о том, что значимой причиной выявленной перемены тенденций межгодовых изменений толщины и объема льда в море Лаптевых является таяние субмаринных толщ многолетнемерзлых пород (далее — СММП), присутствие которых подтверждено в недрах его шельфа [12].

Данный процесс является следствием глобального потепления климата, при котором температура придонных вод повышается и СММП постепенно разрушаются («деградируют»). Скорость этого процесса оценивается в 12–18 см/год [13]. Поскольку в составе СММП практически отсутствует морская соль, образующаяся талая вода поднимается на поверхность, снижая общую поверхностную соленость (ПС) на определенных участках акватории моря. Опресненная вода быстрее замерзает и если на поверхности моря присутствует ледяной покров, то способствует увеличению его средней толщины (далее — СТЛ) и объема. За счет деградации СММП происходит локальное увеличение впадины моря, что приводит к снижению уровня его водной поверхности (далее — УВП). Образующийся вследствие намерзания опресненной воды дополнительный ледяной покров вместе с дрейфующим льдом далее может уноситься в северные районы моря и Центральный Арктический бассейн. Справедливость выдвинутой гипотезы не очевидна, поскольку объем талой воды, образующейся в море Лаптевых вследствие таяния СММП, неизвестен. Ее подтверждением могло бы служить выявление в этом море районов, где для зимне-весенних месяцев значимые тенденции увеличения СТЛ сочетаются со значимыми тенденциями уменьшения УВП и ПС.

Косвенным свидетельством в пользу выдвинутой гипотезы являются результаты работы [14], где на примере Карского моря показано, что межгодовые изменения ледовых условий в некоторых районах арктических морей могут быть связаны с происходящими в них изменениями УВП и ПС. Тем не менее для моря Лаптевых ее справедливость для зимне-весенних месяцев ранее не оценивалась, а тенденции изменений СТЛ, УВП и ПС не учитывались при ориентировочном прогнозировании условий навигации и освоении природных ресурсов шельфа в данном регионе.

Целью настоящей работы является проверка выдвинутой гипотезы, а также выявление районов моря Лаптевых, в которых между изменениями среднемесячных значений СТЛ, УВП и ПС имеет место указанное ранее соответствие.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) оценка современных тенденций изменений средней толщины ледяного покрова различных районов моря Лаптевых для зимне-весенних месяцев;
- 2) выявление тенденций межгодовых изменений УВП и ПС в этом море в те же месяцы;
- 3) проверка наличия соответствия между тенденциями межгодовых изменений указанных показателей, позволяющая подтвердить выдвинутую гипотезу.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В процессе решения указанных задач в качестве фактического материала использована информация о среднесуточных значениях толщины ледяного покрова, уровня водной поверхности и поверхностной солености моря Лаптевых, полученная из реанализа GLORYS12v1¹. На момент исследования данные были доступны за период с 1.01.1993 по 31.12.2019 с дискретностью по координатам 0,0833°.

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

Методика решения первой и второй задачи предполагала оценку тенденций межгодовых изменений СТЛ, УВП и ПС для различных участков акватории изучаемого моря, соответствующих зимне-весенним месяцам, за периоды 1993–2006 гг. и 2007–2019 гг. С этой целью для всех пунктов, соответствующих узлам координатной сетки реанализа, для каждого зимне-весеннего месяца из его данных были сформированы временные ряды значений рассматриваемых показателей.

В качестве количественной меры оцениваемой тенденции рассматривался угловой коэффициент линейного тренда соответствующего временного ряда, вычисленный по методу наименьших квадратов. При оценке статистической значимости тенденции были использованы стандартные методы математической статистики [15]. Тенденция межгодовых изменений каждого изучаемого процесса признавалась значимой, если достоверность такого статистического вывода составляла не менее 0,9. При решении третьей задачи применялся метод сравнения.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

При решении первой задачи была выполнена оценка статистически значимых тенденций межгодовых изменений СТЛ в море Лаптевых в зимне-весенние месяцы. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты для января и февраля.

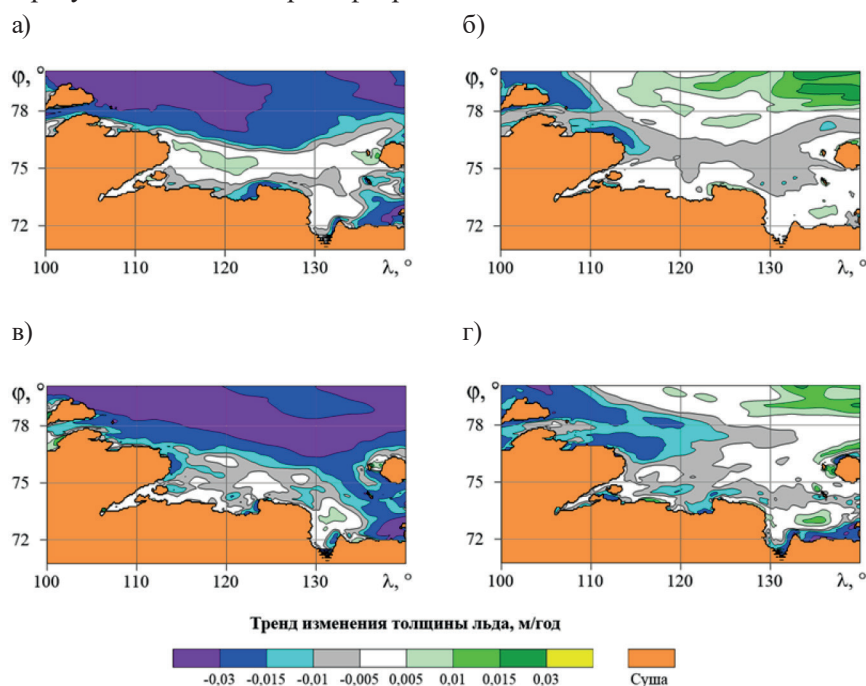


Рис. 1. Тенденции межгодовых изменений средней толщины льда в море Лаптевых:

а — январь 1993–2006 гг.; б — январь 2006–2019 гг.;
в — февраль 2006–2019 гг.; г — февраль (2006–2019 гг.)

Как следует из рис. 1, а, в, в 1993–2006 гг. на большей части моря Лаптевых преобладали явно выраженные тенденции к уменьшению СТЛ. Менее выраженными (или вообще отсутствующими) они оставались в южной части моря и в районе Новосибирских островов. В 2006–2019 гг. тенденции существенно изменились (рис. 1, б, г). Уменьшение СТЛ продолжилось только в западной части моря, при этом во всех остальных районах этот процесс либо остановился, либо сменился на противоположный. Данные по другим зимне-весенним месяцам в целом схожи. Полученные результаты наглядно подтверждают факт сохранения сложных ледовых условий в изучаемом море в современном периоде.

При решении второй задачи аналогичным образом выполнена оценка тенденции межгодовых изменений УВП и ПС. В качестве примера на рис. 2 приведены распределения по акватории моря Лаптевых значимых оценок тенденций межгодовых изменений УВП для января и февраля.

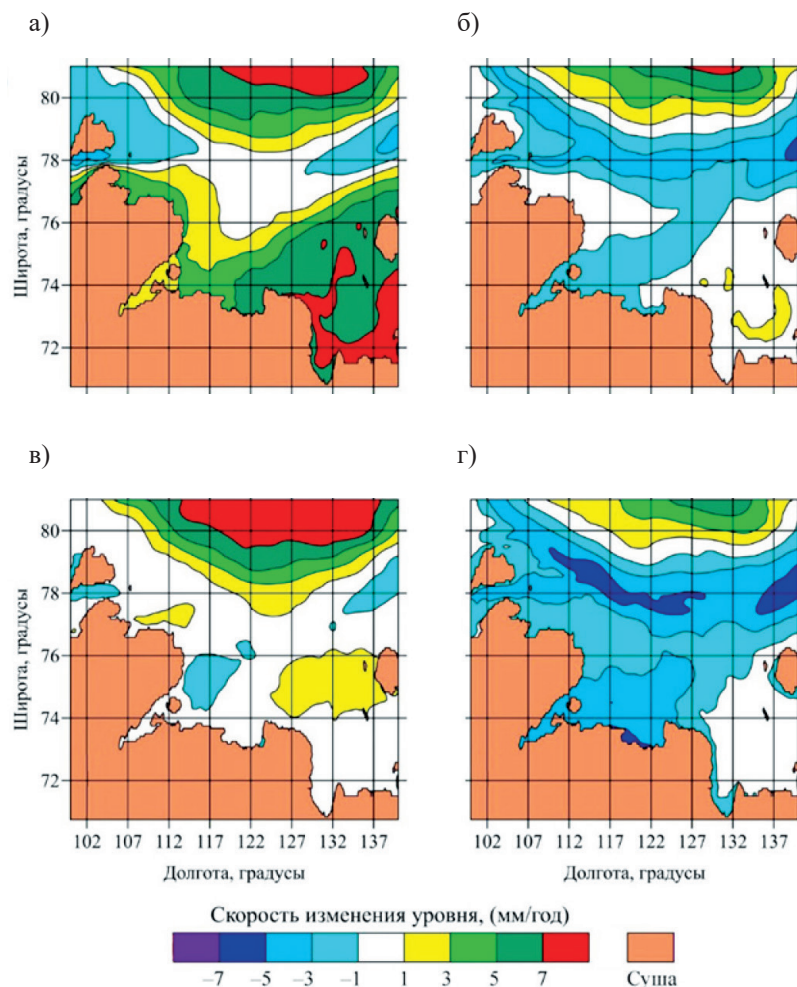


Рис. 2. Тенденции межгодовых изменений уровня водной поверхности в море Лаптевых:
а — январь 1993–2006 гг.; б — январь 2006–2019 гг.;
в — февраль 2006–2019 гг.; г — февраль (2006–2019 гг.)

Анализ рис. 2, а, в показал, что в 1993–2006 гг. в море Лаптевых преобладали возрастающие тренды УВП (что в полной мере соответствует представлениям [7], [8], [16] о последствиях потепления регионального климата). В 2006–2019 гг. ситуация изменилась (рис. 2, б, г) — стали преобладать районы, где уровень значительно снижался. Они включали прежде всего центральную и южную части моря, в том числе участки, относящиеся к Великой Сибирской полынье, используемой в судоходстве. В целом можно констатировать, что во многих районах моря Лаптевых в 1993–2019 гг. происходило значимое снижение УВП с декабря по март, причем в 2006–2019 гг. суммарная площадь таких районов значительно увеличилась. Тенденции изменения ПС в различных районах моря Лаптевых приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в целом по морю значимых изменений поверхностной солености, согласно данным реанализа, не происходило. Однако был обнаружен участок акватории, расположенный между северной частью дельты реки Лены и западной оконечностью острова Котельный (на рис. 3 выделен красным кругом), в котором во все зимне-весенние месяцы ПС уменьшалась. Этот и окружающие районы моря являются местом формирования Западной Новосибирской заприпайной полыньи (входит в состав Великой Сибирской полыньи), в процессе которого в поверхностном слое моря выделяется достаточно большое количество соли. Следовательно, полученный результат возможен лишь при условии существования в указанном районе моря Лаптевых мощного источника пресной воды, значительно снижающего ПС в изучаемые месяцы.

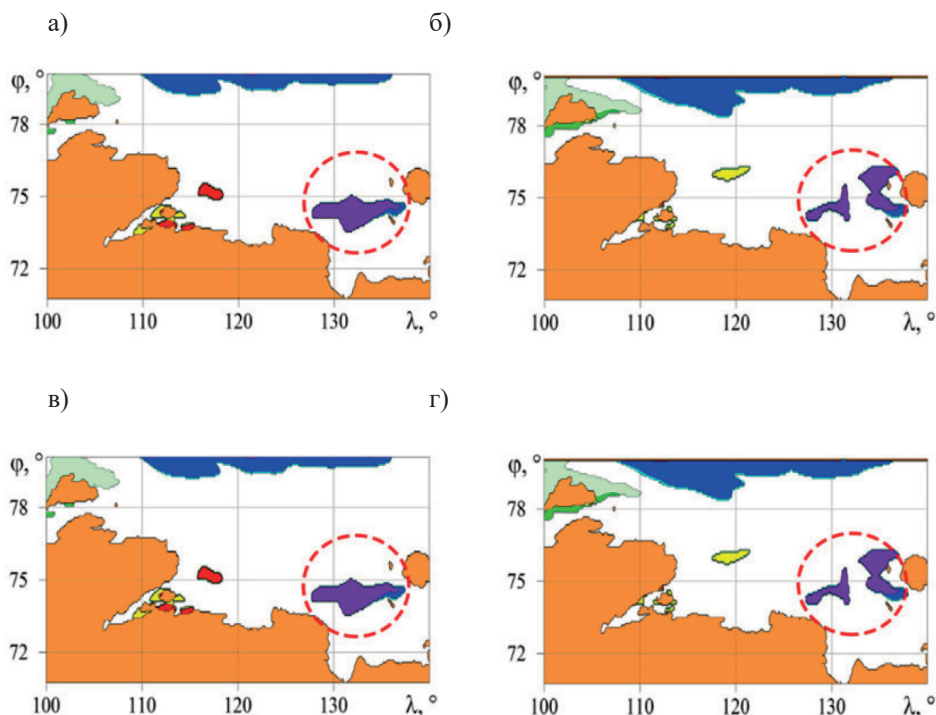


Рис. 3. Тенденции межгодовых изменений поверхностной солености в море Лаптевых по месяцам:

a — декабрь; *б* — январь; *в* — февраль; *г* — март

При решении третьей задачи установлено, что районы моря Лаптевых, где в зимне-весенние месяцы между тенденциями межгодовых изменений СТЛ, УВП и ПС имеет место искомое соответствие, существуют и расположены в его восточной и центральной частях. Это позволяет подтвердить справедливость выдвинутой гипотезы.

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Полученные результаты в целом соответствуют существующим представлениям о причинах изменений УВП и ПС различных районов моря Лаптевых в зимне-весенний период [9], а также изменений их СТЛ [16]. Они позволяют на качественном уровне объяснить выявленный в течение последних двух десятилетий феномен сохранения сложной ледовой обстановки в этом регионе в условиях продолжающегося потепления климата [10], а также допустить справедливость такого предположения для других морей Российской Арктики, в которых присутствуют аналогичные компоненты субмаринной криолитосферы.

Влияние процесса таяния СММП на изменения СТЛ для зимне-весенних месяцев можно считать значимым для выявленных районов моря Лаптевых. Наиболее вероятной причиной перемены тенденций сокращения ледяного покрова в этом регионе в сторону его роста, как ни парадоксально, является глобальное потепление климата, вызывающее ускоренное таяние СММП в недрах его шельфа [12], [13], [17], [18]. С определенной степенью уверенности можно предположить, что в ближайшей перспективе последствия указанного процесса не приведут к облегчению условий навигации в море Лаптевых в зимне-весенний сезон. Очевидно, что таяние СММП на шельфе — не единственный фактор, который может приводить к осложнению ледовых условий в регионе и, например, оказать влияние на скорость движения крупнотоннажных судов [19]. Поэтому вопрос о том, насколько существенным является вклад в формирование ледовой обстановки рассматриваемого процесса, действующего совместно с иными факторами, нуждается в дополнительном изучении.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Межгодовые изменения ледовых условий на участках Северного морского пути, расположенных в море Лаптевых (за исключением западной его части), по данным 2006–2019 гг. в зимне-весенний период не демонстрировали тенденций к улучшению.
2. Одним из факторов, способствующих сохранению сложной ледовой обстановки в море Лаптевых, может являться глобальное потепление климата, которое способствовало ускорению процесса таяния субмаринных толщ многолетнемерзлых пород на его шельфе и вызывало опреснение его поверхностных вод.
3. При сохранении текущих тенденций климатических изменений в будущем снижение уровня моря Лаптевых и увеличение толщины его ледяного покрова в зимне-весенние месяцы является вероятным.
4. Выявленные факты подтверждают необходимость и целесообразность дальнейшего развития ледокольного флота России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думанская И. О. Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке / И. О. Думанская // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2016. — № 362. — С. 129–154.
2. Schacha M. Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics / M. Schacha, R. Madlenerb // Energy Policy. — 2018. — Vol. 122. — Pp. 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.
3. 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: 10.24411/2658-4255-2020-12115.
4. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
5. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматов // 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.
6. 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.
7. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий / И. И. Мохов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
8. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г. В. Алексеев // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2015. — Т. 1. — С. 11–26.
9. Моря Российской Арктики в современных климатических условиях / под ред. И. М. Ашика. — СПб.: Изд. ААНИИ. — 2021. — 360 с.
10. Kholoptsev A. V. Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin // Russian Meteorology and Hydrology. — 2021. — No. 6. — Pp. 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
11. Kholoptsev A. V. Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. V. Karetnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.
12. Koshurnikov A. V. Submarine permafrost in the Laptev sea / A. V. Koshurnikov, V. E. Tumskoy, V. V. Skosar, Y. O. Efimov, K. A. Kornishin, A. T. Bekker, Yu. G. Piskunov, N. Ya. Tsimbelman, D. A. Kosmach // International Journal of Offshore and Polar Engineering. — 2020. — Vol. 30. — Is. 01. — Pp. 86–93. DOI: 10.17736/ijope.2020.jc783.

13. Charkin A. N. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea / A. N. Charkin, M. Rutgers van der Loeff, N. E. Shakhova, Ö. Gustafsson, O. V. Dudarev, M. S. Cherepnev, A. N. Salyuk, A. V. Koshurnikov, E. A. Spivak, A. Y. Gunar, A. S. Ruban, I. P. Semiletov // *The Cryosphere*. — 2017. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 2305–2327. DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.
14. Kholoptsev A. V. Variations in the Kara Sea Level, Their Steric Factors, and Solar Radiation during 1993–2018 / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. A. Safonov // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — Vol. 46. — Is. 8. — Pp. 519–529. DOI: 10.3103/S1068373921080033.
15. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
16. Катцов В. М. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики / В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев // *Арктика: экология и экономика*. — 2012. — № 2 (6). — С. 066–079.
17. Кошурников А. В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России / А. В. Кошурников // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. — 2020. — № 3. — С. 116–125. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-116-125.
18. Холопцев А. В. Связи изменений ледовой обстановки на Северном морском пути с движением планет Солнечной системы / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин, Е. О. Ольховик // *Арктика: экология и экономика*. — 2023. — Т. 13. — № 2. — С. 310–321. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.
19. Ольховик Е. О. Исследование изменения скорости крупнотажных судов в ледовых условиях акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 705–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712.

REFERENCES

1. Dumanskaya, Irina O. “Some tendencies in change of ice parameters of the Arctic seas in the 21st century.” *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation* 362 (2016): 129–154.
2. Schach, Michael, and Reinhard Madlener. “Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics.” *Energy Policy* 122 (2018): 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.
3. 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* 4(11) (2020): 39–58. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12115.
4. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new Siberian islands during the winter period.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
5. 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.
6. 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.
7. Mokhov, Igor I. “Features of modern climate change in the Arctic and their consequences.” *Arctic and Antarctic Research* 66 (2020): 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
8. Alekseev, G.V. “Development and amplification of global warming in the Arctic.” *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* 1 (2015): 11–26.
9. Ashik I. M., ed. *Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. SPb.: AANIL, 2021.
10. Kholoptsev, A. V., and S. A. Podporin. “Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer.” *Russian Meteorology and Hydrology* 46 (2021): 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
11. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. V. Karetnikov. “Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 867. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.
12. Koshurnikov, Andrey V., Vladimir E. Tumskoy, Vladimir V. Skosar, Yaroslav O. Efimov, Konstantin A. Kornishin, Alexander T. Bekker, Yuri G. Piskunov, Nikita Ya. Tsimbelman, and Denis A. Kosmach. “Submarine

permafrost in the Laptev sea.” *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 30.01 (2020): 86–93. DOI: 10.17736/ijope.2020.jc783.

13. Charkin, Alexander N., Michiel Rutgers van der Loeff, Natalia E. Shakhova, Örjan Gustafsson, Oleg V. Dudarev, Maxim S. Cherepnev, Anatoly N. Salyuk, Andrey V. Koshurnikov, Eduard A. Spivak, Alexey Y. Gunar, Alexey S. Ruban, and Igor P. Semiletov. “Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea.” *The Cryosphere* 11.5 (2017): 2305–2327. DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.

14. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. A. Safonov. “Variations in the Kara Sea Level, Their Steric Factors, and Solar Radiation during 1993–2018.” *Russian Meteorology and Hydrology* 46.8 (2021): 519–529. DOI: 10.3103/S1068373921080033.

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

16. Kattsov, V. M., and B. N. Porfiriev. “Climate Changes in the Arctic: Impact on Environment and Economy.” *Arctic: Ecology and Economy* 2(6) (2012): 066–079.

17. Koshurnikov, A. V. “Basics of complex geocryological-geophysical analysis for the research of permafrost and gas-hydrogates on the Arctic shelf of Russia.” *Moscow University Geology Bulletin. Series 4. Geology* 3 (2020): 116–125. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-116-125.

18. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and E. O. Ol’Khovik. “Changes in the ice situation on the Northern Sea Route depending on the movement of the Solar system planets.” *Arctic: Ecology and Economy* 13.2 (2023): 310–321. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.

19. Ol’Khovik, Evgeniy O. “Research the change of ship’s speed with large-capacity in ice conditions on area of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 705-712. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: kholoptsev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor,
leading researcher
Sevastopol branch
of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str.,
Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023 г.
Received: October 30, 2023.

**ADAPTIVE DYNAMIC SAFETY DOMAIN
FOR DIFFERENT SAILING CONDITIONS****S. V. Smolentsev, A. E. Filyakov, D. V. Isakov**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of navigation safety is considered, in particular, the problem of developing an algorithm for an adaptive dynamic safety domain for various navigation conditions is investigated. The risk assessment of a ship approach situation is based on the safety domain as the minimum area around the ship into which an oncoming ship should not enter. Navigation conditions are considered in accordance with the rules of COLREG-72 for navigation of vessels with limited visibility and being in sight of each other. To solve this problem, the navigation areas are classified. For further analysis, a table for the conditions and areas of navigation to identify the shape of the domains is created. The hydro meteorological situation, which takes into account the navigation conditions, and as a consequence, the need to increase the size of the safety domain, is considered. Changes in the parameters and shape of ship safety domains for different navigation conditions have been identified. For each district and navigation conditions, an original configuration of the security domain is proposed. The dynamic changes of the domain during movement in traffic separation systems and channels are separately considered. Using an example, a situation when the bow of the domain crosses the dividing line, which can lead to the appearance of false dangerous targets, is simulated. To avoid such situations, a dynamic domain with a changing shape in the form of an ellipse for swimming in a traffic separation system and channels, taking into account sailing conditions with limited visibility and in sight of each other is proposed. For the calculation, an algorithm to determine the shape of the domain under different visibility conditions and navigation areas has been compiled. Calculations for the case when the vessel enters a turn in traffic separation systems and narrow spaces have been performed. The deformation of the domain during rotation is shown.

Keywords: ship security domain, navigation safety, visibility conditions, classification of navigation areas.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., Alexey E. Filyakov, and Dmitry V. Isakov. "Adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940.

УДК 656.61.052: 658.011.56**АДАПТИВНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ДОМЕН БЕЗОПАСНОСТИ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ****С. В. Смоленцев, А. Е. Филляков, Д. В. Исаков**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена проблема безопасности мореплавания, в частности исследована задача по разработке алгоритма адаптивного динамического домена безопасности для различных условий плавания. Оценка опасности ситуации сближения судов строится на основе домена безопасности как минимальной области вокруг судна, в которую не должно заходить встречное судно. Были рассмотрены условия плавания в соответствии с правилами МППСС-72 плавания судов при ограниченной видимости и находящихся на виду друг у друга. Для решения данной задачи классифицированы районы плавания. Для дальнейшего анализа создана таблица по условиям и районам плавания для выявления формы доменов. Выполнен учет гидрометеорологической обстановки исходя из условий плавания, а также показана необходимость увеличения размера домена безопасности при ее ухудшении. Выявлены изменения параметров и формы судовых доменов безопасности для разных условий плавания. Для каждого района и условия плавания предложена оригинальная конфигурация домена безопасности. Отдельно рассмотрено динамическое изменение домена при движении в системах разделения движения и каналах. На примере промоделирована ситуация, когда носовая часть домена пересекает разделительную линию, что может приводить к появлению ложных опасных целей. Во избежание

подобных ситуаций предлагается динамический домен с изменяющейся формой в виде эллипса для плавания в системе разделения движения и каналах с учетом условий плавания при ограниченной видимости и на виду друг у друга. Для вычисления составлен алгоритм определения форм домена при различных условиях видимости и районов плавания. Выполнены расчеты для случая, когда судно входит в поворот в системах разделения движения и узкостях. Показана деформация домена при повороте.

Ключевые слова: судовой домен безопасности, проблема безопасности мореплавания, условия видимости, сближение судов, классификация районов плавания, моделирование ситуации.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Адаптивный динамический домен безопасности для различных условий плавания / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940.

Введение (Introduction)

Динамика роста морских перевозок и, как следствие, интенсивность движения в различных районах Мирового океана увеличивает риск опасных ситуаций и аварий. Как показывает практика, в основном нештатные ситуации возникают в зоне прибрежного плавания, на подходах к портам, в узкостях (каналах) [1]. В настоящее время для описания опасной зоны вокруг собственного судна используется *домен безопасности*. Формы и размеры таких доменов должны быть не постоянными, а зависеть от текущей навигационной обстановки [2].

Целью исследования данной проблемы является выявление новых моделей и методов адаптивного динамического судового домена безопасности для различных условий и районов плавания. Динамический домен служит сохранению заданного уровня безопасности мореплавания во избежание ложных определений опасных ситуаций.

Задачей предлагаемого исследования является разработка алгоритма адаптивного динамического домена безопасности для различных условий плавания. Для этого домена предлагается модель с разными формами для разных районов плавания. Такой подход в конфигурациях домена предоставляет более корректную оценку навигационной ситуации для данных условий плавания. Предложенная модель с различными формами домена безопасности является продолжением уже существующих доменов, рассмотренных в статье «Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена» [1], и в то же время основана на новых подходах. Преимуществом рассматриваемого домена является его форма, изменяемая в зависимости от ситуации и района плавания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для разработки алгоритма адаптивного динамического домена была предложена классификация районов плавания, приведенная на рис. 1: открытое море, система разделения движения, узкости, каналы.



Рис. 1. Классификация районов плавания

Кроме того, были рассмотрены различные условия видимости, которые должны оказывать влияние на оценку опасности сближения. В соответствии с МППСС-72 [3], разд. III «Плавание судов при ограниченной видимости», правило 19, а также правилами разд. II МППСС-72 «Плавание судов, находящихся на виду друг у друга» ограничениями видимости являются: туман, мгла, ливень. Таким образом, необходимо выделить условия плавания, в соответствии с правилом 19 и правилом 11 разд. II «Плавание судов, находящихся на виду друг у друга», приведенные в классификации на рис. 2.

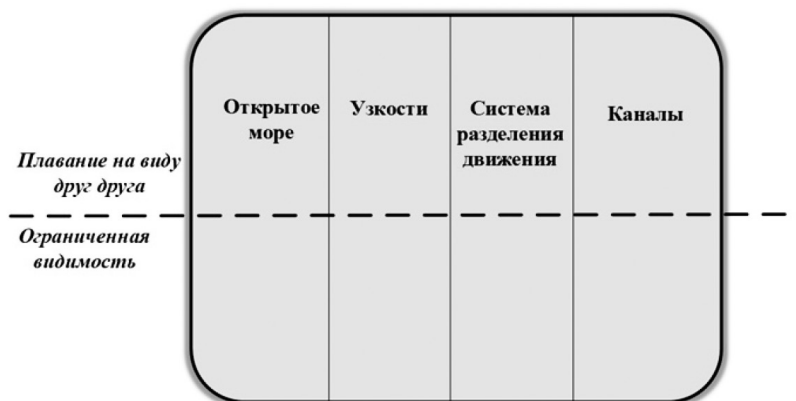


Рис. 2. Классификация условий плавания

При назначении домена безопасности для собственного судна необходимо осуществлять учет текущих навигационных особенностей района плавания. Таким образом, домен безопасности в условиях навигационных ограничений должен отличаться от домена безопасности в открытом море. В частности, необходимо учитывать минимальное расстояние до опасностей в данном районе, а также наличие зон регламентированного движения в системах разделения движения (СРД). При движении в узкости поперечный размер домена безопасности не должен превышать $\frac{1}{4}$ ширины узкости, в противном случае встречные суда будут ошибочно восприниматься как опасные. При движении по своей полосе в СРД поперечный размер домена безопасности не должен превышать $\frac{1}{2}$ ширины полосы движения, иначе встречные суда, идущие по своей полосе, будут ошибочно восприниматься как опасные [1].

Необходимо учитывать изменения условий видимости. В условиях ограниченной видимости следует увеличивать размеры домена безопасности. Предлагаемый домен безопасности создается для более адекватной оценки уровня навигационной ситуации при расхождении судов. Для него необходимо использовать модель с разными формами, предназначенными для разных районов плавания. Для этого нужно учитывать следующие факторы:

1. Правила МППСС.
2. Навигационные особенности района плавания.
3. Интенсивность мореплавания.
4. Гидрометеорологическую обстановку (в частности, видимость в зоне плавания).
5. Динамику судна, его управляемость.

На рис. 3–5 предложено три формы домена безопасности.

Примечание. Все рисунки, приведенные в работе, являются оригинальными.

Круговой домен безопасности. Этот домен безопасности, который представляет собой круг, рекомендуется для открытого моря. Предполагается, что в открытом море цели могут появляться с любого направления и быть опасны. Кроме того, использование данного домена позволит просто и быстро оценить степени опасности встречной цели. Параметром домена является радиус круга или CPA (Closest Point of Approach) [4].

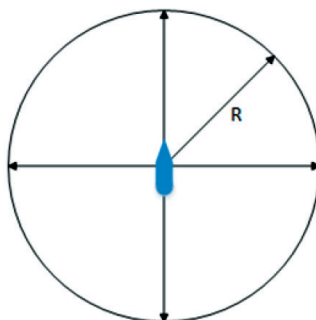


Рис. 3. Круговой домен безопасности

Домен безопасности в виде эллипса. Для плавания в СРД, и каналах предлагается использовать домен в виде эллипса. Предполагается, что цели могут двигаться справа и слева достаточно близко от собственного судна параллельными курсами, не представляя при этом опасности [5]. Опасности представляют только те цели, которые движутся по носу или корме. Поскольку цели по носу считаются более опасными, то центр эллипса может быть смещен к носу. Параметрами данного домена для эллипса без смещения являются значения a , b , со смещением вперед — значения a , b , c [1], [6].

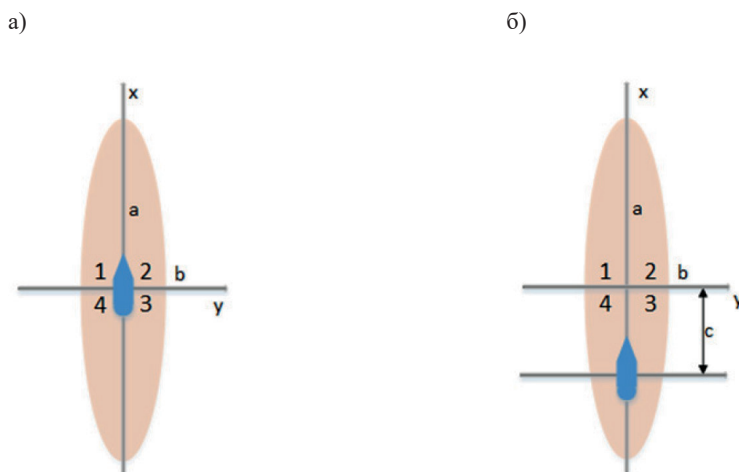


Рис. 4. Домен безопасности:
 a — в виде эллипса; b — в виде эллипса со смещением центра

Комплексный домен безопасности. Данный домен предполагает разные степени опасности целей для различных курсовых углов. В частности, цели на кормовых курсовых углах и траверза левого борта считаются менее опасными, чем цели по носу или правому борту. Параметрами комплексного домена являются a , b , c , d [8].

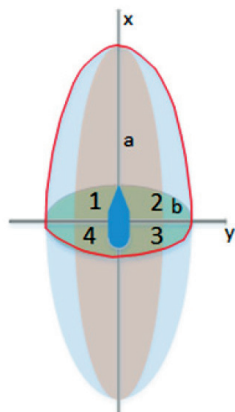


Рис. 5. Комплексный домен безопасности

Использование доменов в разных условиях плавания. На основе выполненного анализа доменов безопасности были предложены следующие конфигурации:

- круговой (для плавания в открытом море);
- комплексный (для плавания в узкостях);
- эллипс для плавания в системе разделения движения и каналах [1], [9].

Кроме того, предлагается изменять форму и параметры доменов безопасности для различных условий плавания: «плавание судов, находящихся на виду друг у друга» и «плавание судов при ограниченной видимости», которые сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Формы доменов

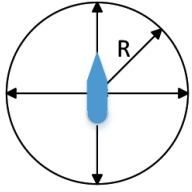
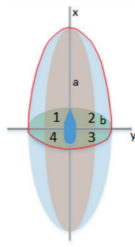
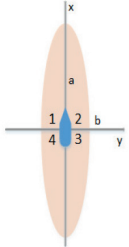
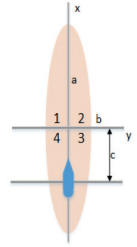
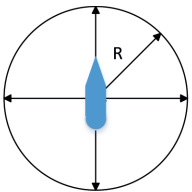
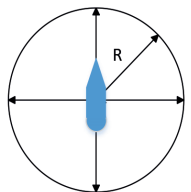
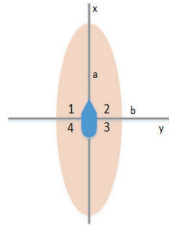
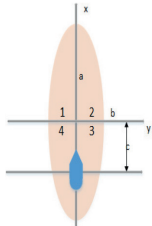
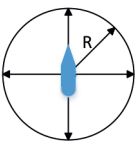
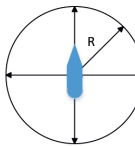
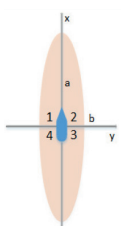
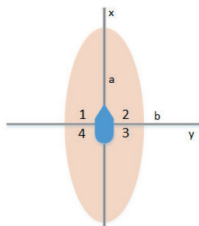
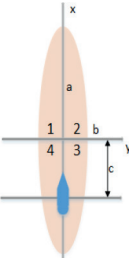
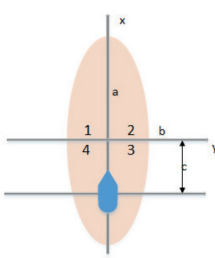
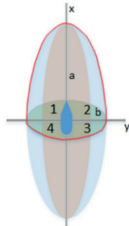
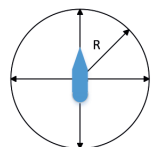
Условия плавания	Районы плавания			
	Открытое море	Узкости	Система разделения движения	Канал
Плавание судов, находящихся на виду друг друга				
Плавание судов при ограниченной видимости				

Таблица 2

Изменение параметров и формы доменов безопасности для разных условий плавания

Домен безопасности	Плавание на виду друг у друга	Плавание при ограниченной видимости	Изменение формы домена при плавании с ограниченной видимостью
	R	$R' = 2R$	
	a, b	$a' = 1,5a$ $b' = 2b$	
	a, b, c	$a' = 1,5a$ $b' = 2b$ $c' = 0$	
	a, b, c, d	$R' = 2a$	

Результаты (Results)

Алгоритм определения формы динамического домена безопасности. Для определения формы домена безопасности в реальных условиях плавания был разработан алгоритм, приведенный на рис. 6. Информацию о текущем положении судна получают от судовой GPS, о текущем районе плавания — из ECDIS, оценку условий видимости — от камер [10].

Динамические изменения домена при движении в СРД и каналах. При движении в узких каналах или полосе СРД и подходе к поворотам возможно попадание носовой части домена в полосу встречного движения. Это может приводить к появлению ложных опасных целей.

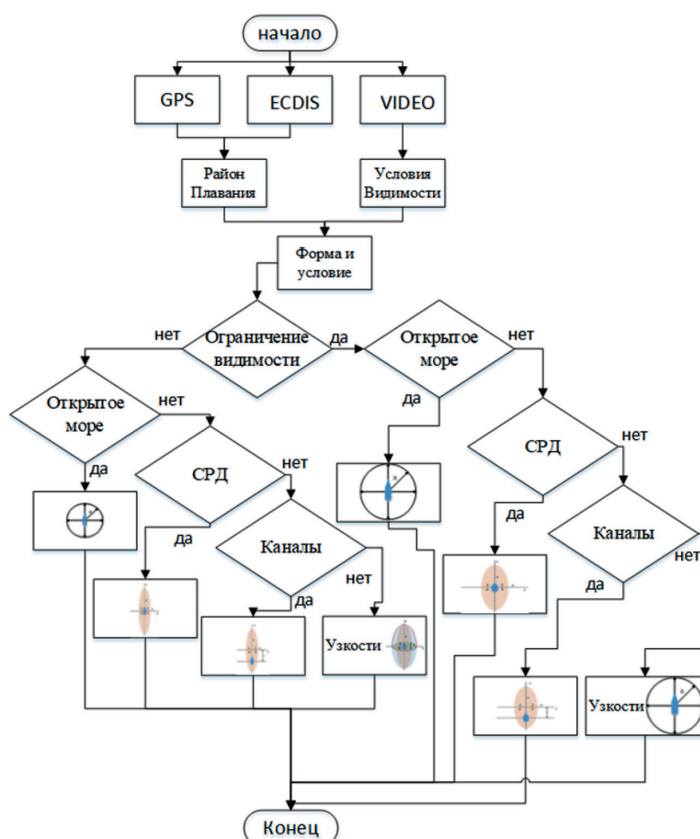


Рис. 6. Алгоритм определения формы динамического домена безопасности

Для исключения подобных ситуаций предлагается динамический домен с изменяющейся формой в виде эллипса для плавания в системе разделения движения и каналах с учетом условий плавания при ограниченной видимости и на виду друг у друга [11]. На рис. 7 показано ложное срабатывание носовой части домена при попадании в полосу встречного движения.

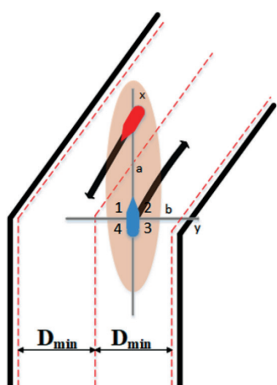


Рис 7. Ложное срабатывание носовой части домена в полосе встречного движения

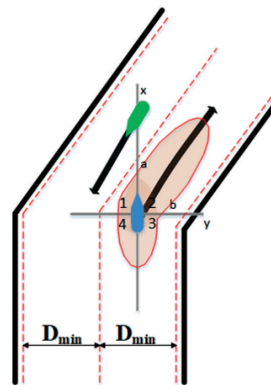


Рис 8. Предлагаемый вариант домена с изменяющейся формой

На рис. 8 приведен предлагаемый вариант динамического домена с изменяющийся формой [1], [7].

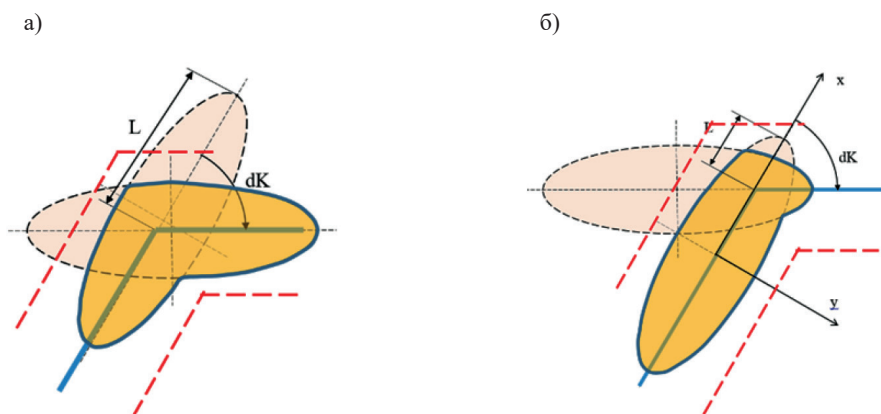


Рис. 9. Процесс деформации домена безопасности:
а — при повороте судна в узкостях (начало поворота);
б — при повороте судна в узкостях с изменяющийся формой

На рис. 9 показан процесс деформации домена безопасности при повороте судна в узкостях. Для построения деформированного эллипса необходимо рассматривать два эллипса: исходный и повернутый. В связанной с судном системе координат уравнения для обоих эллипсов выглядят следующим образом:

Исходный эллипс:

$$y = \pm b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

Повернутый эллипс:

$$x' = x \cos(dK) + y \sin(dK) + dx;$$

$$y' = -x \sin(dK) + y \cos(dK) + dy;$$

$$dx = 2(a - L) \sin^2(dK / 2);$$

$$dy = 2(a - L) \sin\left(\frac{dK}{2}\right) \cos(dK / 2).$$

где a, b — полуоси эллипса.

Форма результирующего домена безопасности формируется как комбинация исходного и повернутого эллипса и изменяется по мере движения судна к точке поворота, а затем на новом участке маршрута [12]. При этом положение собственного судна внутри исходного эллипса (и, соответственно, результирующего домена безопасности) может быть как в центре, так и смещено назад.

Заключение (Conclusion)

В статье рассмотрены вопросы оценки безопасности судна на основе домена безопасности. Предложено использовать динамический домен безопасности, который может изменять свою форму и размеры в зависимости от текущих навигационных условий. В частности, предложены несколько базовых форм домена безопасности в зависимости от района плавания: открытое море, СРД, каналы, узкости. Кроме того, предлагается изменять параметры этих доменов в зависимости от условий видимости.

Важным результатом является предлагаемый в работе метод деформации домена безопасности в случае движения судна в канале или полосе СРД. Использование деформированного домена безопасности позволяет исключить ложные срабатывания модуля оценки опасности сближения при движении в этих условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев С. В. Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.
2. Егоров И. Б. Концепция зон навигационной безопасности и её применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 13–17.
3. Коккрофт А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Дж. Н. Ф. Ламейер; пер. с англ. (с небольшими сокр.) Н. Я. Брызгина и Н. Т. Шайхутдинова; под ред. Н. Я. Брызгина. — М.: Транспорт, 1981. — 280 с.
4. Fujii Y. Traffic capacity / Y. Fujii, K. Tanaka // The Journal of navigation. — 1971. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
5. Goodwin E. M. A statistical study of ship domains / E. M. Goodwin // The Journal of navigation. — 1975. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
6. Davis P. V. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas / P. V. Davis, M. J. Dove, C. T. Stockel // The journal of Navigation. — 1980. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
7. Гриняк В. М. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, М. В. Трофимов // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3–1 (33). — С. 269–273.
8. Tam C. K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / C. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // The Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
9. Zhao J.-S. Comments of ship domains / J.-S. Zhao, Z.-L. Wu, F.-C. Wang, E. M. Goodwin // The Journal of Navigation. — 1993. — Vol. 46. — No. 3. — Pp. 422–436.
10. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
11. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гаращенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.
12. Гриняк В. М. Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11 (125). — С. 36–42. DOI: 10.14489/vkit.2014.011.pp.036–042.

REFERENCES

1. Smolentsev, Sergey V., and Alexey E. Filyakov. “Convergence danger degree assessment based on the dynamic ship’s safety domain.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.
2. Egorov, I. B., and V. A. Loginovsky. “Review of ship domain concept and it’s application in navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 13–17.
3. Cockcroft, A. N., and J. N. F. Lameijer. *A guide to the collision avoidance rules*. 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2012.
4. Fujii, Yahei, and Kenichi Tanaka. “Traffic capacity.” *The Journal of navigation* 24.4 (1971): 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
5. Goodwin, Elisabeth M. “A statistical study of ship domains.” *The Journal of navigation* 28.3 (1975): 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
6. Davis, P. V., M. J. Dove, and C. T. Stockel. “A computer simulation of marine traffic using domains and arenas.” *The journal of Navigation* 33.2 (1980): 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
7. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisil’nyi, and M. V. Trofimov. “Vizual’noe predstavlenie parametrov traektorii bezopasnogo dvizheniya sudna.” *Marine Intelligent Technologies* 3–1(33) (2016): 269–273.
8. Tam, CheeKuang, Richard Bucknall, and Alistair Greig. “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters.” *The Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
9. Zhao, Jing-Sung, Zhao-Lin Wu, Feng-Chen Wang, and E. M. Goodwin. “Comments of ship domains.” *The Journal of Navigation* 46.3 (1993): 422–436.

10. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
11. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. "The methods for conception of ship's domain." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.
12. Grinyak, V. M., and A. S. Devyatisilny. "Fuzzy logic decision-making system for ships collision avoidance." *Herald of computer and information technologies* 11(125) (2014): 36–42. DOI: 10.14489/vkit.2014.011.pp.036–042.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Филяков Алексей Евгеньевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru
Исаков Дмитрий Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, dmail@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Filyakov, Alexey E. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru
Isakov, Dmitry V. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, dmail@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 октября 2023 г.
Received: October 2, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950

THE BEARINGS AND DISTANCES ISOLINES COMBINATIONS OF THE NAVIGATIONAL LANDMARKS PAIR FOR THE VESSEL FIXED POSITION DETERMINATION

A. S. Vas'kov¹, A. A. Mironenko²

¹ — Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Russian Federation

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

The issues of applying basic navigation parameters (bearing and distance), and their isolines traditionally used in navigation practice in coastal waters are studied in the paper. A new distinctive feature is the use of isolines combinations (three distance arcs, two isoazimuths, a hyperbola and an ellipse) based on measured bearings and distances to the pair of landmarks to obtain the vessel fixed positions with high precision. The traditional navigation methods (the theory of isolines, the generalized method of lines position, the method of least squares) are involved as a mathematical framework. The mathematical argumentation and the isolines characteristics of bearings and distances, their combinations (difference and sum of distances, difference of bearings) are given. The solutions of the surplus equations of the lines position under random error influence by the least squares method and the accuracy assessment of the vessel fix position by the radial error including the reduced variant to compensate the systematic errors are suggested. The principal points of the research are supported by the graphic interpretation, and the given expressions are adjusted to the practical application and navigation systems software development. The computer simulation that shows the radial error of the fixed position by seven position lines is at least two times less than by a pair of position lines has been carried out. The formalization of the proposed methods in the automatic navigation systems or in autonomous ship control systems will enable the navigator on board or at operating the vessel remotely to solve the problems of the navigation information processing in coastal and congested waters on a new level.

Keywords: navigation parameter, distance arc, isoazimuth, ellipse, hyperbola, position line, least squares method, vessel fixed position, radial error.

For citation:

Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "The bearings and distances isolines combinations of the navigational landmarks pair for the vessel fixed position determination." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950.

УДК 656.61.052.4

КОМБИНАЦИИ ИЗОЛИНИЙ ПЕЛЕНГОВ И ДИСТАНЦИЙ ПАРЫ НАВИГАЦИОННЫХ ОРИЕНТИРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБСЕРВОВАННОГО МЕСТА СУДНА

А. С. Васьков¹, А. А. Мироненко²

¹ — ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова», Новороссийск, Российская Федерация

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

В работе исследованы варианты комбинирования основных навигационных параметров (пеленг и дистанция) и их изолиний, традиционно применяемых в практике судовождения в условиях прибрежного плавания. Рассмотрена новая отличительная особенность, такая как использование комбинаций изолиний (три окружности, две изопеленги, гипербола и эллипс), полученных по измеренным пеленгам и дистанциям до пары ориентиров для определения координат обсервованного места судна с избыточной точностью. В качестве математического аппарата задействованы классические методы навигации (теория изолиний, обобщенный метод линий положения, метод наименьших квадратов). Дано математическое обоснование

и характеристики изолиний исходных параметров: пеленгов и дистанций, их комбинации (разность и сумма дистанций, разность пеленгов). Предложены решения исходных избыточных уравнений линий положения методом наименьших квадратов при гипотезе действия случайных погрешностей измерений и редуцированных вариантов уравнений линий положения для компенсации систематических погрешностей с оценкой точности обсервованного места судна радиальной погрешностью. Основные положения исследования подкреплены графической интерпретацией, а приведенные выражения доведены до уровня непосредственного практического применения и разработки программного обеспечения систем навигации. Выполнено компьютерное моделирование вариантов решения уравнений линий положения, показывающее, что радиальная погрешность обсервованного места судна по семи линиям положения возможных комбинаций пеленгов и дистанций пары ориентиров как минимум на порядок (в 10 раз) меньше, чем любая из пар линий положения. Формализация предлагаемых методов в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту и управляющему судном дистанционно решать задачи обработки соответствующей навигационной информации пар ориентиров в прибрежных и стесненных районах плавания на качественно новом уровне.

Ключевые слова: навигационный параметр, изостадия, изоазимут, эллипс, гипербола, линия положения, метод наименьших квадратов, обсервованное место судна, радиальная погрешность.

Для цитирования:

Васьков А. С. Комбинации изолиний пеленгов и дистанций пары навигационных ориентиров для определения обсервованного места судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950.

Введение (Introduction)

В исследованиях [1]–[3] выполнен подробный анализ оперативного контроля обеспечения безопасности движения судна по запланированному маршруту (программной траектории (ПТ)) в стесненных водах с помощью использования изолиний измеряемых навигационных параметров (НП) — пеленгов и дистанций до навигационных ориентиров или их комбинации — технологии параллельной индексации (ПИ). На основе результатов исследования и практики судовождения [4]–[7] обоснована более надежная идентификация ориентиров и, следовательно, навигационной обстановки при использовании двух характерно расположенных ориентиров. Измерения НП по двум ориентирам позволяют исключить ошибки опознавания, получить не только ведущие, контрольные и ограждающие изолинии (линии положения (ЛП)) для оперативного контроля процесса движения судна, но и координаты обсервованного места судна (ОМС).

Целью настоящей публикации является исследование возможности применения дополнительных типов изолиний, образованных различными комбинациями измеренных исходных НП — пеленгов и дистанций пары навигационных ориентиров.

В данном случае могут быть получены следующие варианты изолиний: окружности (по дистанциям до ориентиров — изостадии и горизонтальному углу между ориентирами по разности двух пеленгов — изогона); изопеленги / ортодромии (по прямым и обратным пеленгам ориентиров, соответственно); софокусные гиперболы (по разностям дистанций до ориентиров) и эллипсы (по сумме дистанций до ориентиров). Отдельные аспекты применения софокусных гипербол и эллипсов для определения места судна на поверхности сферы рассматривались в исследовании [8]. Таким образом, одномоментное и совместное измерение пеленгов и дистанций до пары навигационных ориентиров позволяет получить избыточные изолинии для определения координат ОМС и контроля параметров движения судна по ПТ — в общем случае семь (три окружности, два изопеленга, гипербола и эллипс).

Горизонтальный угол, или разность пеленгов пары ориентиров, широко использовался в классической морской навигации до появления радионавигационных систем навигации, а разность дистанций пары ориентиров являлась основным навигационным параметром гиперболических радионавигационных систем, построенных на основе различных принципов ее измерения [4], [6]. Пары навигационных ориентиров могут выбираться вручную или с помощью специально разработанных программных приложений, например, для современных ECDIS. Непрерывные изме-

рения и сопровождения НП (пеленгов и дистанций) пар навигационных ориентиров также могут выполняться автоматически с помощью РЛС (САРП) [9]. Предполагаемое рассмотрение изолиний НП относится к малым дистанциям, поэтому разработка является дополнительной поддержкой развития методов и средств судовождения перспективных морских автономных надводных судов (МАНС) в стесненных условиях плавания [2], [3], [10].

В дополнение к существующим методам планирования и контроля движения судна по прямолинейным и криволинейным ПТ [1]–[3] возникает необходимость разработки комплексных математических моделей использования указанных ранее типов изолиний пар навигационных ориентиров, в частности изолиний постоянной (окружности) и переменной кривизны (гипербола и эллипс). Последние позволяют решать проблемы оперативного контроля движения судна по криволинейной траектории, а именно оценивать угловую скорость поворота судна во взаимосвязи со скоростью движения судна относительно грунта по запланированному радиусу кривизны ПТ. Избыточность изолиний способствует решению задач уменьшения действия случайных и компенсации систематических погрешностей измерений НП [11]–[16].

Методы и материалы (Methods and Materials)

На основе классической теории определения координат ОМС¹ и предварительных исследований авторов [2]–[4], [6], [11], [13]–[16] уравнения и свойства предложенных для анализа изолиний в системе прямоугольных координат, связанных с центром пары (базы) ориентиров или смещенным центром (при необходимости), представлены в графическом виде на рис. 1.

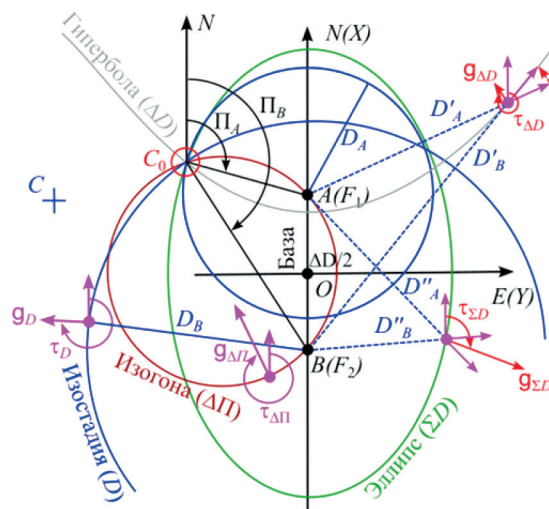


Рис. 1. Изолинии пары ориентиров: XOY — прямоугольная система координат, связанная с базой ориентиров; N, E — направления на север и восток; C, C_o — счислимое и обсервованное место судна; $A(F_1), B(F_2)$ — ориентиры (софокусы гиперболы и эллипса); P_A, P_B — пеленги на ориентиры; D_A, D_B — дистанции до ориентиров; ΔD — разность дистанций до ориентиров; ΣD — сумма дистанций до ориентиров; τ_D, g_D — соответственно направление и модуль градиентов дистанции; $\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}$ — соответственно направление и модуль градиента разности дистанций; $\tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$ — соответственно направление и модуль градиента суммы дистанций

Изолинии окружностей для НП дистанций и горизонтального угла:

$$x_i^2 + y_i^2 = R^2; (x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 = R^2; \quad (1)$$

$$R=(D_A,D_B)=\text{const}; \tau_D=\Pi_{AB}180; g_D=1; \quad (2)$$

¹ Мореходные таблицы (МТ-2000). № 9011. СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. 576 с.

$$R = \frac{d}{2 \sin \gamma}; g_{\gamma} = 57,3 \frac{d}{D_A D_B}; \gamma = |\Pi_A - \Pi_B| = \text{const}; \gamma = \Pi_A + \delta; \text{ctg } \delta = \frac{D_A \sin \gamma}{D_B - D_A \cos \gamma}, \quad (3)$$

где x_i, y_i, x_o, y_o, R — прямоугольные координаты ориентиров, смещения центра и радиус окружности — изолиний, мили;

D_A, D_B, d — дистанции до ориентиров и базовое расстояние, мили;

$\Pi_A, \Pi_B, \gamma, \delta$ — пеленги на ориентиры, горизонтальный угол между ориентирами и вспомогательный угол, °;

$\tau_D, \tau_{\gamma}, g_D, g_{\gamma}$ — направления и модули градиентов дистанций и горизонтального угла.

Изолинии — изопеленги для НП — прямого пеленга:

$$\Pi_i = \arctg \frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}; \Pi_i = (\Pi_A, \Pi_B) = \text{const}; g_{\Pi(A, B)} = \frac{57,7^\circ}{D_{A, B}}, \text{ } ^\circ/\text{мили}; \tau_{\Pi(A, B)} = \Pi_i - 90^\circ, \quad (4)$$

где $\tau_{\Pi(A, B)}, g_{\Pi(A, B)}$ — направления и модули градиентов пеленгов, °, °/мили; x_c, y_c — прямоугольные координаты счислимого места судна, мили.

Изолинии — гиперболы для НП — разности дистанций:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1; \frac{(x - x_o)^2}{a^2} - \frac{(y - y_o)^2}{b^2} = 1; \quad (5)$$

$$a = \frac{\Delta D}{2} = \frac{D_A - D_B}{2} = \text{const}; b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2}; e = \frac{d}{2a};$$

$$\tau_{\Delta D} = \Pi_{cp} \pm 90^\circ = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 90^\circ; g_{\Delta D} = \left| 2 \sin \frac{w}{2} \right|; w = \Pi_A - \Pi_B, \quad (6)$$

где a, b, e — соответственно большая, малая полуоси и эксцентриситет гиперболы;

$\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}$ — соответственно направления и модули градиентов разности дистанций, °;

Π_{cp}, w — соответственно средний пеленг между ориентирами и базовый угол, °.

Изолинии — эллипса для НП — суммы дистанций:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1; \frac{(x - x_o)^2}{a^2} + \frac{(y - y_o)^2}{b^2} = 1; \quad (7)$$

$$a = \frac{D_A + D_B}{2} = \text{const}; b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}}; a > 0,5d > b;$$

$$\tau_{\Sigma D} = \Pi_{cp} \pm 180^\circ = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 180^\circ; g_{\Sigma D} = \left| 2 \cos \frac{w}{2} \right|, \quad (8)$$

где $\tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$ — направления и модули градиентов сумма дистанций, °.

Для уменьшения погрешностей изолиний (или ЛП), из-за исходных погрешностей измерений, необходимо, чтобы значения модулей градиентов изолиний были как можно больше, как следует из приведенного выражения:

$$m_{\text{ЛП}i} = \frac{m_i}{g_i}, \quad (9)$$

где $m_i, m_{\text{ЛП}i}$ — средние квадратические погрешности (СКП) измерений НП и ЛП;

g_i — модули градиентов ЛП (2)–(4), (6), (7).

Из выражений (3), (4), (6) для градиентов горизонтального угла, пеленга и разности дистанций такое условие (8) достигается выбором пар навигационных ориентиров, база которых находится как можно ближе к судну. Однако для модуля градиента изолинии эллипса (7) недопустимо, чтобы базовый угол был близок к 180° , при котором градиент будет равен нулю. Пересечение изолиний

пеленгов и дистанций по каждому из ориентиров, эллипса и гиперболы пары ориентиров, и, соответственно, их ЛП, всегда будет под углом 90° , т. е. имеет наилучшее значение с позиций влияния погрешностей на ОМС [13]–[15].

Решение задачи определения координат ОМС при избыточных ЛП может быть выполнено с применением обобщенного метода линий положения и метода наименьших квадратов (МНК), или непосредственным совместным решением уравнений изолиний (1), (4)–(7), а также с применением МНК. Переход от прямоугольных координат к любым другим (в частности, географическим) может быть выполнен с использованием методов, подробно изложенных в работе [17].

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Для применения обобщенного метода линий положения уравнения ЛП в системе координат, связанных с парой ориентиров, целесообразно представить в нормальном виде, чтобы привести единицы измерения исходных и косвенных НП к одинаковой размерности (морским милям):

$$\Delta x \cos \tau_i + \Delta y \sin \tau_i = l_i; \quad l_i = \frac{\Delta \text{НП}_i}{g_i}; \quad x_o = x_c + \Delta x; \quad y_o = y_c + \Delta y, \quad (10)$$

где $\Delta x, \Delta y$ — искомые поправки к счислимым координатам судна для получения обсервованных;
 $\Delta \text{НП}, l_i, \tau_i$ — разности измеренных (обсервованных) и счислимого значений НП соответственно, смещения ЛП относительно координат счислимого места судна (СМС), направления градиентов ЛП;
 x_c, y_c — координаты СМС;
 x_o, y_o — искомые координаты ОМС.

Для определения координат ОМС необходимо совместно решить минимум пару уравнений ЛП (9) по возможным сочетаниям из семи изолиний (ЛП). Радиальная погрешность ОМС по двум ЛП оценивается выражением

$$M_o = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{m_{\text{ЛП1}}^2 + m_{\text{ЛП2}}^2}; \quad \theta = \tau_1 - \tau_2, \quad (11)$$

где θ — угол пересечения пар ЛП.

При гипотезе действия в уравнениях ЛП (10) только случайных погрешностей, после применения МНК к системе семи уравнений ЛП пары ориентиров с двумя искомыми поправками к СМС, получается система двух нормальных уравнений определения вероятнейших координат ОМС [13]–[16]:

$$\left. \begin{aligned} A_1 \Delta x + B_1 \Delta y &= L_1; \\ A_2 \Delta x + B_2 \Delta y &= L_2; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^n P_i \cos^2 \tau_i; \quad B_1 = A_2 = \sum_{i=1}^n P_i \sin \tau_i \cos \tau_i; \quad B_2 = \sum_{i=1}^n P_i \sin^2 \tau_i; \quad (13)$$

$$L_1 = \sum_{i=1}^n P_i l_i \cos \tau_i; \quad L_2 = \sum_{i=1}^n P_i l_i \sin \tau_i; \quad P_i = m_{\text{ЛП}_i}^{-2}; \quad n = 7;$$

$$\Delta x = \frac{B_2 L_1 - B_1 L_2}{\Delta}; \quad \Delta y = \frac{A_1 L_2 - A_2 L_1}{\Delta}; \quad \Delta = A_1 B_2 - A_2 B_1, \quad (14)$$

где A, B, L_i — коэффициенты нормальных уравнений ЛП (НЛП);

P_i — вес исходных ЛП;

n — количество исходных ЛП.

Радиальная погрешность вероятнейшего ОМС оценивается через СКП ЛП с единичным весом, полученным по вероятнейшим поправкам относительно ОМС после его определения (12), следующим выражением:

$$M_o = m_1 \sqrt{\frac{A_1 + B_2}{\Delta}} = \sqrt{\frac{\sum P_i}{\Delta}}; \quad (15)$$

$$m_1 = \sqrt{\frac{\sum P_i (l_i - \Delta x \cos \tau_i - \Delta y \sin \tau_i)^2}{n-2}},$$

где m_1 — СКП ЛП с единичным весом относительно вероятнейшего ОМС.

Решения системы уравнений (12)–(14) могут быть представлены в векторно-матричной форме, элементы которых формируются из составляющих исходных уравнений ЛП (10), что позволяет также исключить возможные проблемы, когда главный определитель системы (14) может оказаться равным нулю [11], [13], [14]:

$$PA\Delta X = PL; \Delta X = (A^T P A)^{-1} A^T P^{-1} L; \quad (16)$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}; A^T = \begin{bmatrix} \cos \tau_1 & \cos \tau_2 & \dots & \cos \tau_n \\ \sin \tau_1 & \sin \tau_2 & \dots & \sin \tau_n \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \tau_1 & \sin \tau_1 \\ \cos \tau_2 & \sin \tau_2 \\ \dots & \dots \\ \cos \tau_n & \sin \tau_n \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{bmatrix}; P = \begin{bmatrix} 1/m_{\text{ЛП}_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/m_{\text{ЛП}_2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/m_{\text{ЛП}_n}^2 \end{bmatrix},$$

где ΔX — матрица-столбец искоемых неизвестных ($\Delta x, \Delta y$);

A, A^T — матрица коэффициентов исходных ЛП и ее транспонированная матрица;

L — матрица-столбец переносов ЛП;

P, P^{-1} — прямая и обратная матрицы весов исходных ЛП.

При совместном действии в исходных уравнениях ЛП (10) случайных и систематических погрешностей их коэффициенты перед применением МНК редуцируются соответствующими им средними значениями [14], [16], отдельно по каждому НП. В результате получаются НЛП (12), коэффициенты которых, в отличие от (13), принимают следующий вид и могут использоваться при любых гипотезах действия типов погрешностей:

$$\begin{aligned} A_1 &= \sum_1^n P_i \left(\cos \tau_i - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right)^2; \quad B_1 = A_2 = \sum_1^n P_i \left(\cos \tau_i - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \left(\sin \tau_i - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right); \\ B_2 &= \sum_1^n P_i \left(\sin \tau_i - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right)^2; \\ L_1 &= \sum_1^n P_i \left(\cos \tau_i - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \left(l_i - \frac{\sum_1^n l_i}{n} \right); \quad L_2 = \sum_1^n P_i \left(\sin \tau_i - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \left(l_i - \frac{\sum_1^n l_i}{n} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Радиальная погрешность вероятнейшего ОМС в данном случае оценивается выражением (15), но с СКП единичным весом, полученным по ЛП с редуцированными коэффициентами (17):

$$m_1 = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i \left(\left(l_i - \frac{\sum_1^n l_i}{n} \right) - \Delta x \left(\cos \tau_i - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) - \Delta y \left(\sin \tau_i - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \right)^2}{n-2}}.$$

Для векторно-матричного вида уравнений (16) при совместном действии случайных и систематических погрешностей для разнородных НП при решении системы уравнений НЛП (12) с редуцированными коэффициентами (17) элементы матриц и векторов примут следующий вид:

$$A^B = \begin{bmatrix} \left(\cos \tau_1 - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \left(\cos \tau_2 - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \dots \left(\cos \tau_n - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \\ \left(\sin \tau_1 - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \left(\sin \tau_2 - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \dots \left(\sin \tau_n - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(\cos \tau_1 - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \left(\sin \tau_1 - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \\ \left(\cos \tau_2 - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \left(\sin \tau_2 - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \\ \dots \\ \left(\cos \tau_n - \frac{\sum_1^n \cos \tau_i}{n} \right) \left(\sin \tau_n - \frac{\sum_1^n \sin \tau_i}{n} \right) \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} l_1 - \frac{\sum_1^n l_i}{n} \\ l_2 - \frac{\sum_1^n l_i}{n} \\ \dots \\ l_n - \frac{\sum_1^n l_i}{n} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Работоспособность представленных методов и алгоритмов определения ОМС апробирована компьютерным моделированием для следующих исходных данных, снятых с крупномасштабной карты и представленных в таблице.

Исходные данные определения координат ОМС судна по паре ориентиров

Ориентир	Пеленг, °		Дистанция, мили		Угол, °		ΔD , мили		ΣD , мили		База, мили	Координаты, мили	
	Π_A / Π_B	m_Π	D_A / D_B	m_D	γ	m_γ	ΔD	$m_{\Delta D}$	ΣD	$m_{\Sigma D}$	d	x	y
$A (F_1)$	45,0	0,5	5,66	0,015	121,0	0,1	10,83	0,015	22,15	0,015	20,00	10,00	0,00
$B (F_2)$	166,0	0,5	16,49	0,015								-10,00	0,00
СМС												6,00	-4,00

Результаты моделирования определения координат ОМС с соответствующими радиальными погрешностями представлены для сравнения на планшете (рис. 2), графики — на рис. 3.

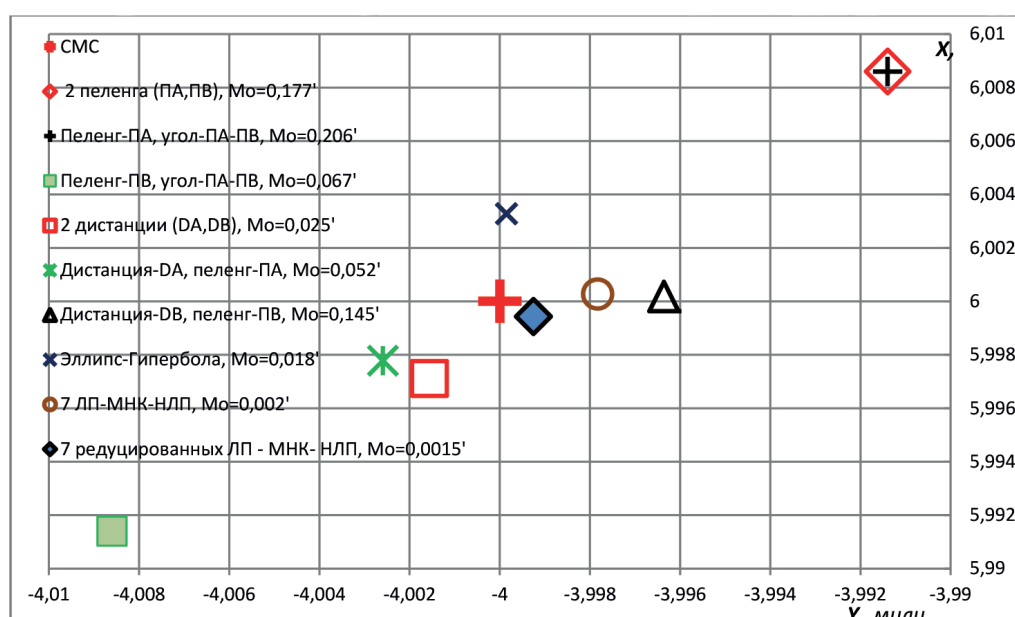


Рис. 2. Результаты определения координат ОМС при различных сочетаниях НП пары ориентиров

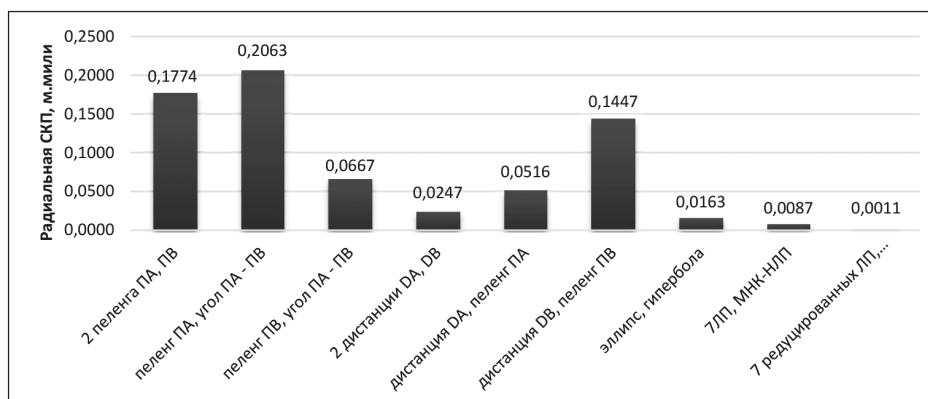


Рис. 3. Радиальные погрешности определения координат ОМС при различных сочетаниях НП пары ориентиров

Решения осуществлялись по двум уравнениям ЛП (10) при различных вариантах сочетаний измеренных НП и по всем семи ЛП пары ориентиров по уравнениям НЛП (12) для получения вероятнейших ОМС с гипотезами действия как только случайных погрешностей, так и совместно случайных и систематических погрешностей.

Учитывая различные СКП НП и значения модулей их градиентов (2), (4), (6), (7) координаты ОМС, полученные по первой итерации, по двум ЛП имеют разброс. Как и следовало ожидать, наибольшие отклонения от вероятнейших ОМС и радиальные погрешности наблюдаются у ОМС по двум пеленгам, пеленгам и горизонтальному углу ввиду малых значений модулей их градиентов из-за дистанций до ориентиров. Из сравнения видно, что вероятнейшие ОМС имеют радиальные погрешности на два порядка меньше по сравнению с ОМС по любым двум ЛП.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение пары ориентиров для определения координат ОМС позволяет однозначно опознавать эти ориентиры по характерному направлению их базы и дистанции между ориентирами в отличие от использования одного ориентира. Предлагаемые методы могут быть успешно реализованы с помощью современных существующих технических средств и программного обеспечения: РЛС–САРП и ECDIS. Данный аспект важен в целях повышения безопасности традиционного и перспективного автономного судовождения в стесненных водах.

2. В перспективе подлежит изучению проблема наилучшего выбора взаимного расположения пар навигационных ориентиров из возможных вариантов с целью повышения точности ОМС от характерного расположения отдельных изолиний при использовании их в качестве ведущих, контрольных и ограждающих ЛП в соответствии с конкретным участком программной траектории движения и навигационных условий плавания судна.

3. Актуальным является дальнейшее исследование одновременного использования пар трех-четырех ориентиров с измерением и сопровождением только пеленгов и дистанций. При этом количество изолиний для определения координат ОМС увеличивается в разы по сравнению с одной парой ориентиров, что обеспечит наилучшее расположение изолиний (ЛП) относительно опасностей и программной траектории движения судна и, соответственно, повысит точность и надежность ОМС, а также безопасность плавания при традиционном и автономном судовождении в стесненных водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьков А. С. Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.

2. Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
3. Васьков А. С. Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1 (61). — С. 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.
4. Баранов Ю. К. Навигация / Ю. К. Баранов, М. И. Гаврюк, В. А. Логиновский, Ю. А. Песков. — СПб.: Лань, 1997. — 512 с.
5. Песков Ю. А. Руководство по «Организации мостика» для судов / Ю. А. Песков. — Новороссийск: НГМА, 2002. — Т. 1. — 146 с.
6. Практическое кораблевождение: для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Книга первая / Под ред. А. П. Михайловского. — СПб.: ГУН и О, 1889. — 896 с.
7. Swift A. I. Bridge team management. A Practical Guide / A. I. Swift. — Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004. — 118 p.
8. Санаев А. И. Аналитическое определение места судна в прибрежной зоне / А. И. Санаев, В. И. Меньшиков, М. А. Пасечников // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2002. — Т. 5. — № 2. — С. 195–202.
9. Bole A. Radar and ARPA Manual Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users / A. Bole, A. Wall, A. Norris. — UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. — 552 p.
10. Мироненко А. А. Методология формирования навигационной обстановки и программирования движений судна / А. А. Мироненко. — Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2016. — 162 с.
11. Афанасьев Б. В. Расчет координат места судна: учеб. пособие по МОС / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев, В. А. Логиновский. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 84 с.
12. Логиновский В. А. Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.
13. Кожухов В. П. Математические основы судовождения / В. П. Кожухов, А. М. Жухлин, В. Т. Кондрашихин [и др.]. — М.: Транспорт, 1993. — 200 с.
14. Васьков А. С. Математические основы судовождения / А. С. Васьков, А. А. Мироненко. — СПб.: Лань, 2023. — 244 с.
15. Груздев Н. М. Оценка точности морского судовождения / Н. М. Груздев. — М.: Транспорт, 1989. — 191 с.
16. Родионов А. И. Автоматизация судовождения / А. И. Родионов, А. Е. Сазонов. — М.: Транспорт, 1992. — 192 с.
17. Васьков А. С. Взаимосвязь систем координат положения и кинематических характеристик движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 1(102). — С. 28–33. DOI: 10.34046/aumsuomtl02/6.

REFERENCES

1. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "The ship motion control by navigational parameters and parallel indexes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.
2. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "Planning and control of the ship curvilinear route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
3. Vas'kov, A.S., and A. A. Mironenko. "The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems." *Marine intellectual technologies* 3–1(61) (2023): 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.
4. Baranov, Yu.K., M. I. Gavryuk, V. A. Loginovskii, and Yu. A. Peskov. *Navigatsiya*. SPb.: Lan', 1997.
5. Peskov, Yu. A. *Rukovodstvo po «Organizatsii mostika» dlya sudov*. Vol. 1. Novorossiisk: NGMA, 2002.
6. Mikhailovskii, A. P. *Prakticheskoe korablevozhdenie: dlya komandirov korablei, shturmanov i vakhtennykh ofitserov. Kniga pervaya*. SPb.: GUN i O, 1889.
7. Swift, A. I. *Bridge team management. A Practical Guide*. Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004.

8. Sanaev, A.I., V. I. Men'shikov, and M. A. Pasechnikov. "Analiticheskoe opredelenie mesta sudna v pribrezhnoi zone." *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 5.2 (2002): 195–202.
9. Bole, A., A. Wall, and A. Norris. *Radar and ARPA Manual Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users*. UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
10. Mironenko, A. A. *Metodologiya formirovaniya navigatsionnoi obstanovki i programmirovaniya dvizhenii sudna*. Novorossiisk: RIO GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2016.
11. Afanas'ev, B. V., V. V. Afanas'ev, and V. A. Loginovskii. *Raschet koordinat mesta sudna: Uchebnoe posobie po MOS*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2020.
12. Loginovsky, Vladimir A. "Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 161–171. DOI: 10.21821/2309–5180–2023–15–2–161–171.
13. Kozhukhov, V. P., A. M. Zhukhlin, V. T. Kondrashikhin, V. A. Loginovskii, and A. N. Lukin. *Matematicheskie osnovy sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1993.
14. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. *Matematicheskie osnovy sudovozhdeniya*. SPb.: Lan', 2023.
15. Gruzdev, N. M. *Otsenka tochnosti morskogo sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1989.
16. Rodionov, A. I., and A. E. Sazonov. *Avtomatizatsiya sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1992.
17. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. "Coordinate systems and vessel's movement kinematic characteristics interconnection." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(102) (2022): 28–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васьков Анатолий Семёнович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93
e-mail: as.vaskov@mail.ru
Мироненко Александр Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: alex_mironenko@mail.ru,
mironenkoaa@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vas'kov, Anatoliy S. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Ushakov State
Maritime University
93 Lenin Ave., Novorossisk, 353924,
Russian Federation
e-mail: as.vaskov@mail.ru
Mironenko, Aleksandr 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: alex_mironenko@mail.ru,
mironenkoaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.
Received: September 26, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-951-958

MODIFICATION OF THE WAVE ALGORITHM FOR EUCLIDEAN DISTANCES CALCULATION IN TRANSPORT APPLICATIONS

A. L. Kuznetsov

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

Many engineering problems could be either reduced to or directly involve the mathematical problem of finding the shortest path in some confined space with obstacles. To solve this problem, graph theory and dynamic programming offers quite a lot of exact and heuristic algorithms that work with directed and undirected, weighted and unweighted, connected and disconnected graphs. All these methods are based on their own techniques of calculating the distance between the vertices, the choice of which is dictated by the convenience of implementation and methodological considerations. As a result, the resulted paths found by the algorithms usually are characterized by a certain abstract length, which is often difficult to convert into Euclidean one. Nevertheless, spatial problems in engineering practice often require an answer in terms of real physical distances. Specifically, such a task fully arises in engineering applications related to the design of seaports, namely, in the laying of routes of intra-terminal transport, power supply networks, in the design of approach channels. A modification of the most common method for finding the shortest paths, the wave orthogonal-diagonal algorithm, is described in the paper. It allows you to include the geometric characteristics of its individual sections in the calculation of the length of the found route, which makes it possible to accurately estimate the length in the sense of the Euclidean distance.

Keywords: path finding algorithm, Euclidean distance, Manhattan metric, geometric characteristics, engineering applications, routing routes.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L. "Modification of the wave algorithm for Euclidean distances calculation in transport applications." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-951-958.

УДК 656.615

МОДИФИКАЦИЯ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭВКЛИДОВЫХ РАССТОЯНИЙ В ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧАХ

А. А. Кузнецов

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

Предметом настоящего исследования является математическая проблема нахождения кратчайшего пути в некотором ограниченном пространстве с препятствиями с помощью теории графов и динамического программирования, в которой предусмотрено достаточно много точных и эвристических алгоритмов, работающих с ориентированными и неориентированными, взвешенными и невзвешенными, связными и несвязными графами. Все эти методы предполагают различные способы расчета расстояния между вершинами, выбор которых обусловлен удобством реализации и методическими соображениями. Как следствие, найденные пути характеризуются некоторой абстрактной длиной, которая чаще всего трудно поддается пересчету в эвклидову. Тем не менее пространственные задачи в инженерной практике зачастую требуют получения результата именно в реальных физических расстояниях. В статье выполнено описание модификации наиболее распространенного метода поиска кратчайших путей — волнового ортогонально-диагонального алгоритма, который позволяет включить в расчет длины найденного маршрута геометрические характеристики его отдельных участков, что дает возможность достаточно точно оценить длину в смысле эвклидова расстояния. Отмечается, что в полной мере такая задача возникает в инженерных приложениях, связанных с проектированием морских портов, а именно: при прокладке трасс внутритерминального транспорта и сетей электропитания, при проектировании подходов каналов. К аналогичной проблеме приводит также прокладка маршрутов морских судов в сложных ледовых условиях. Во всех указанных случаях важной является не только

топологическая конфигурация построенного маршрута, но и его оценка в терминах традиционного геометрического расстояния. Невозможность прямого получения этих характеристик сдерживает применение алгоритмических методов поиска оптимальных трасс и путей в практике технологического проектирования, что ограничивает использование цифровых инструментов для повышения эффективности расчетно-конструкторских методов проектирования объектов инфраструктуры морского транспорта.

Ключевые слова: технологическое проектирование портов, алгоритм поиска пути, евклидово расстояние, манхэттенская метрика, геометрические характеристики, инженерные приложения, прокладка маршрутов.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Модификация волнового алгоритма для расчета евклидовых расстояний в транспортных задачах / А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-951-958.

Введение (Introduction)

Во многих инженерных приложениях (теория игр, теория абстрактных автоматов, проектирование электронных узлов, топография и др.) требуется нахождение пути между парой точек в заданной области при наличии препятствий. Для решения этой задачи, как правило сводимой к теории графов, за последние десятилетия предложено много различных алгоритмов [1]–[4], однако поиски новых вариантов решений этой проблемы продолжают [5]–[10].

Одним из первых и до сих пор наиболее популярным среди существующих решений является *волновой алгоритм*, или *алгоритм Ли* [11] с некоторыми модификациями [12]. В то же время большинство предложенных для решения этой задачи алгоритмов в качестве метрики использует не евклидово расстояние, а некоторые иные характеристики, выбор которых определяется методическими соображениями и удобством реализации. Это обстоятельство вызывает определенные сложности при решении задач, требующих оценки реальных пространственных соотношений и расстояний. Подобные задачи возникают, в частности, при проектировании внутрипортовых транспортных сетей и оценке связности морских терминалов с сетью смежного транспорта [13]. К этой же задаче сводится прокладка подходящих каналов к акватории порта, проектирование трасс движения судов в акватории, а также прокладка маршрутов движения морских судов в сложных условиях (например, ледовых или штормовых). Возникающие в процессе использования традиционных алгоритмов поиска пути в дискретном пространстве можно продемонстрировать на примере волнового алгоритма.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Основная идея волнового алгоритма состоит в том, что область поиска пути покрывается сеткой с ячейками подходящего размера, которая разбивает ее на однородные дискреты. Препятствия, не допускающие прокладки маршрута, кодируются символами запрета, как это показано на рис. 1. Из исходной точки в рабочем поле распространяется числовая волна, номер очередного фронта которой фиксируется в рабочем поле (рис. 2). На этом рисунке для наглядности одинаковым цветом выделены дискреты с одинаковым кодом фронта волны. Если распространяемая волна на некотором шаге N достигает конечной точки, то это доказывает существование пути между выбранными точками. Для его нахождения выполняется обратный ход, при котором из конечной точки выбирается дискрет с кодом волны $N - 1$, из которого выбирается дискрет с кодом волны $N - 2$ и так продолжается вплоть до достижения исходной точки (рис. 3, а). Построенный таким образом путь является кратчайшим, но, возможно, не единственным.

Иногда при распространении волны свободные дискреты анализируются только слева, справа и сверху, снизу, т. е. без рассмотрения диагональных «соседей». При подобном ортогональном способе построения найденный кратчайший путь имеет форму, отличающуюся от рассмотренного ранее «полного» алгоритма, называемого *диагонально-ортогональным* (рис. 3, б).

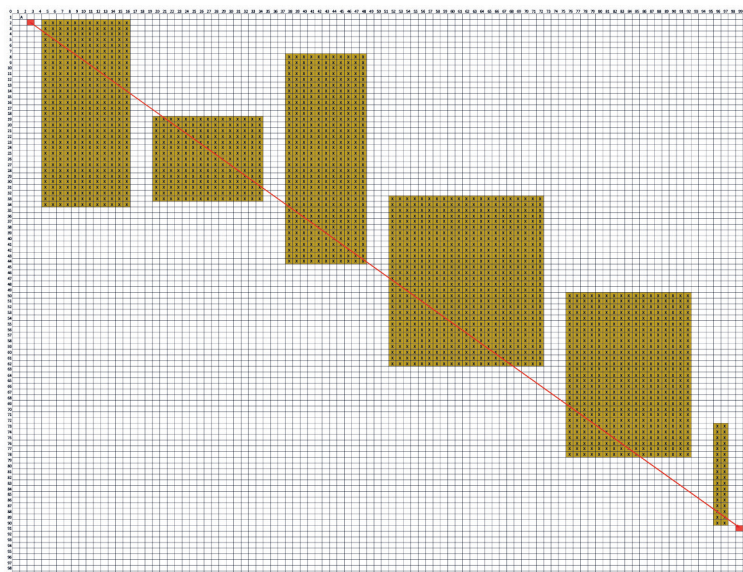


Рис. 1. Представление рабочей области построения пути

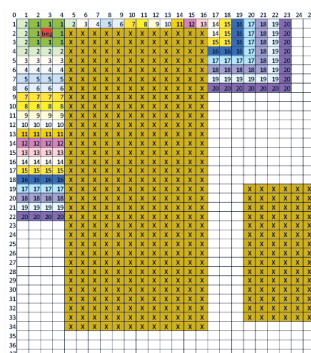


Рис. 2. Первые фазы распространения волны

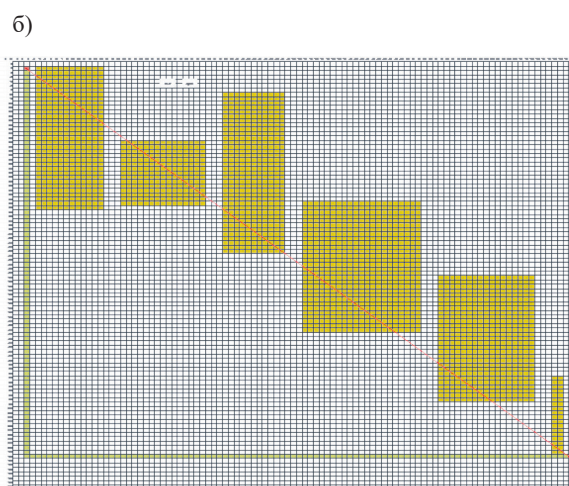
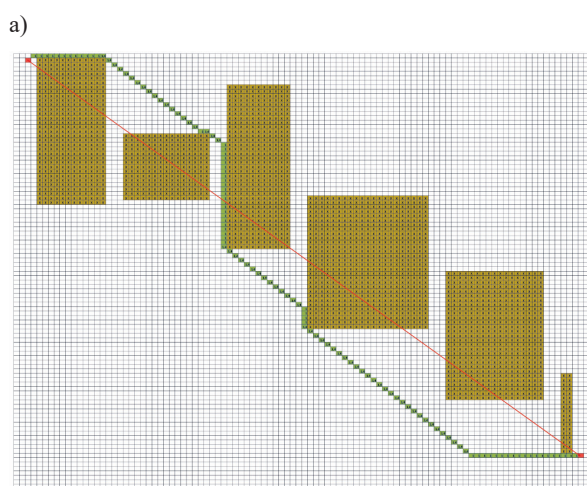


Рис. 3. Путь между заданными точками:

- а — построенный с помощью диагонально-ортогонального волнового алгоритма;
- б — построенный с помощью ортогонального способа распространения волны

Как видно из рис. 3, б, построенная таким способом трасса маршрута значительно отличается от результата, приведенного на рис. 3, а, по конфигурации, но не по длине.

Результаты (Results)

В задачах подобного рода длина пути часто рассчитывается не с помощью эвклидовой $\rho_{AB}^M = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$, а с помощью так называемой манхеттенской метрики: $\rho_{AB}^M = |x_A - x_B| + |y_A - y_B|$. В этом случае длина пути на рис. 3, а совпадает с длиной пути на рис. 3, б. При этом путь на рис. 4, очевидно, имеет большую длину в смысле обычного эвклидова расстояния. В ряде случаев эта разница не принципиальна, в некоторых случаях она не может быть проигнорирована. Например, эвклидова длина приведенного на рис. 4 отрезка равна $9\sqrt{2}$, в то время как число представляющих его дискретов равно 10 для полного и 19 для ортогонального варианта алгоритма.

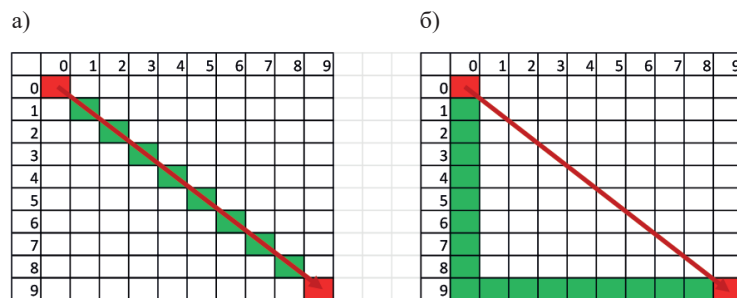


Рис. 4. Длина отрезка пути:
а — ортогонально-диагональный; б — ортогональный

Таким образом, длина построенного пути, измеренная количеством входящих в него дискретов, также не позволяет получить оценку эвклидовой длины. Для того чтобы получить корректное значение эвклидова расстояния, предлагается использовать следующий прием: если в полном варианте алгоритма переход из текущего дискрета в дискрет с предыдущим кодом волны выполняется по вертикали или горизонтали, то длина соответствующего отрезка принимается равной единице.

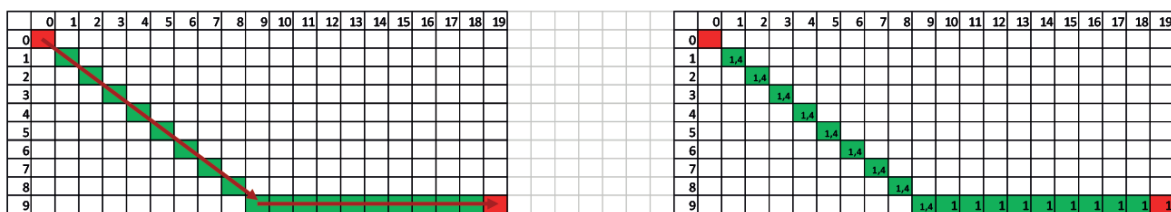


Рис. 5. Расчет эвклидовой длины построенного пути

В случае, если переход выполняется по диагонали, то длина соответствующего отрезка принимается равной $\sqrt{2}$ (рис. 5). Как видно из этого рисунка, рассчитанные количеством дискретов длины обоих отрезков равны между собой, в то время как рассчитанная длина правого отрезка будет больше.

Обсуждение (Discussion)

Суммирование всех значений длин, входящих в построенный путь отрезков, дает оценку эвклидовой длины пути. Легко заметить, что длина ортогонально-диагонального пути определяется выражением

$$\rho_{AB}^{Lee} = \max\{|x_A - x_B|, |y_A - y_B|\} - \min\{|x_A - x_B|, |y_A - y_B|\} + \sqrt{2} \min\{|x_A - x_B|, |y_A - y_B|\}.$$

Действительно, по диагонали путь можно проложить лишь в квадрате, сторона которого определяется минимальным расстоянием между точками по горизонтали и вертикали, т. е.

$\min\{|x_A - x_B|, |y_A - y_B|\}$, который рассчитывается умножением на $\sqrt{2}$, а оставшийся отрезок $\max\{|x_A - x_B|, |y_A - y_B|\} - \min\{|x_A - x_B|, |y_A - y_B|\}$ входит в сумму с множителем «1», т. е. оценивается числом дискретов горизонтальных и вертикальных участков.

Следует отметить, что окружность в рассматриваемом дискретном пространстве, определяемая как совокупность дискретов, равноудаленных от центра, принимает разную форму в зависимости от способа построения пути, т. е. от использования диагонального или диагонально-ортогонального алгоритма. Точнее, это связано с различиями в способе подсчета длины (рис. 6). На этом рисунке расстояние от центра подсчитывается как количество шагов, необходимое для достижения дискрета из центральной точки (0,0). Если расстояние определяется для случая нахождения пути с помощью ортогонально-диагонального алгоритма (рис. 6, б) с использованием предлагаемой на с. 954 формулы, то картина изменится (рис. 7). Дискреты в правой части этого рисунка содержат вычисленные точные значения расстояния ρ_{AB}^{Lee} , в левой части рисунка эти значения округлены до ближайшего целого. Окружность, построенная таким образом, приведена на рис. 8, откуда видно, что некоторые дискреты могут быть достигнуты за семь, а некоторые — за десять шагов распространения волны, при этом евклидово расстояние от центра у них будет приблизительно одинаковым (с точностью до округления).

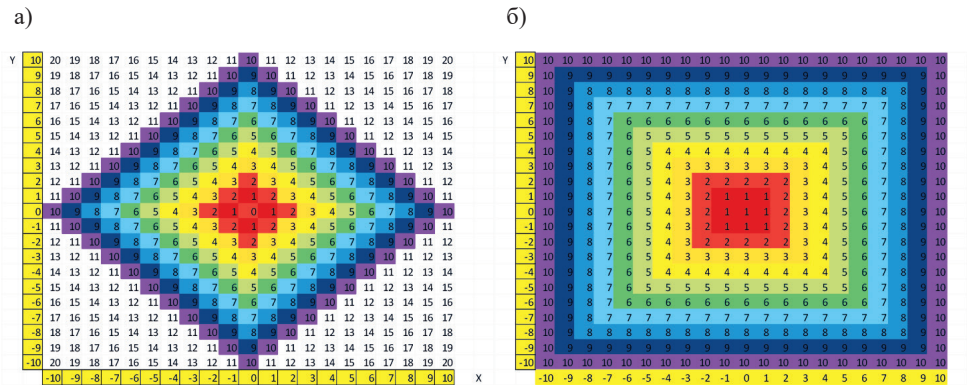


Рис. 6. Окружности в дискретном пространстве:
а — ортогонально-диагональный подсчет расстояния;
б — ортогональный подсчет расстояния

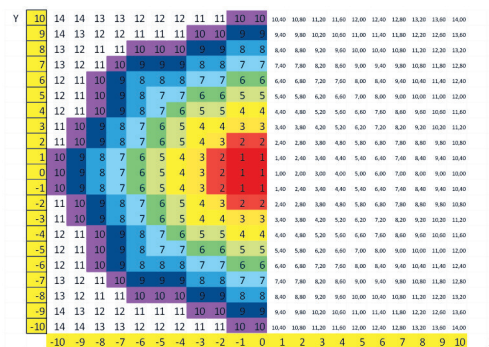
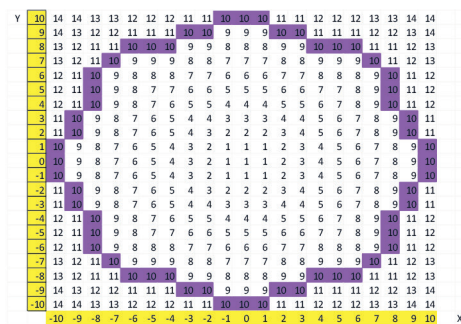


Рис. 7. Евклидовы расстояния
для случая диагонально-ортогонального алгоритма

Предлагаемое решение позволяет легко учесть различия масштабов дискретов по вертикали и горизонтали. Смещение по горизонтали в этом случае считается равным цене дискрета d_x , смещение по вертикали — цене дискрета d_y , смещению по диагонали соответствует длина отрезка $\sqrt{d_x^2 + d_y^2}$.

а)



б)

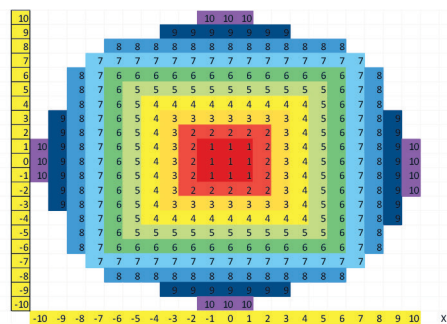


Рис. 8. Окружность, построенная с помощью диагонально-ортогонального алгоритма:
а — расстояние от центра; б — номер шага алгоритма

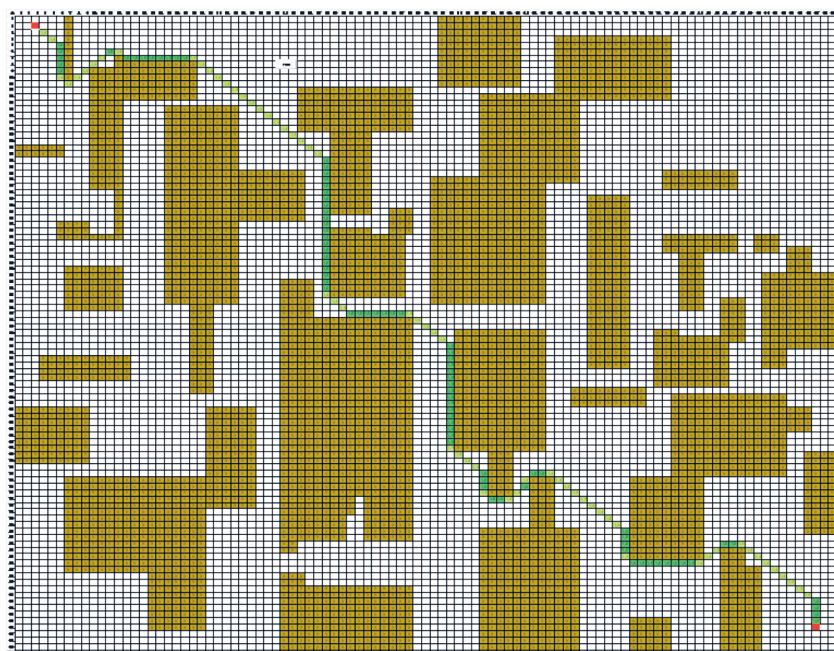


Рис. 9. Построение пути и расчет его эвклидовой длины
с помощью волнового алгоритма

На рис. 9 приведен пример построения пути и расчет его длины для тестового задания. Видно, что построенная трасса имеет вполне рациональную конфигурацию, которую мог бы построить и человек, так как, ее общая длина выражена традиционным эвклидовым расстоянием.

Заключение (Conclusion)

Предложенный в работе алгоритм с достаточной инженерной точностью позволяет решить задачу определения эвклидовой длины трасс, проложенных между заданными точками на ограниченной области дискретной плоскости с препятствиями. Его реализация практически не отличается от реализации классического волнового алгоритма, предполагающего распространение прямой волны и выполнение обратного хода, — меняется лишь подсчет весов при переходе от дискрета пути к следующему дискрету. Алгоритм может быть дополнен возможностью учета различия масштабов дискретов по вертикали и горизонтали, что особенно важно при работе на морских картах.

Для построения более сложных конфигураций, предполагающих *древовидные конфигурации* соединений между некоторым множеством точек, алгоритм может быть рекурсивно продолжен с выбором в качестве начального источника волны всего построенного до этого фрагмента.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что описанный в статье метод является перспективным в ряде инженерных приложений, связанных с технологическим проектированием морских портов, планированием и выбором движения морских судов, а также сопряжением сетей смежного транспорта в хинтерленде. Модернизация и модификация предложенного метода могут увеличить возможность его применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bellman R.* On a routing problem / R. Bellman // *Quarterly of Applied Mathematics*. — 1958. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
2. *Dijkstra E. W.* A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra // *Numerische Mathematik*. — 1959. — Vol. 1. — Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
3. *Евстигнеев В. А.* Итеративные алгоритмы глобального анализа графов. Пути и покрытия / В. А. Евстигнеев; Под ред. А. П. Ершова. — М: Наука, 1985. — 352 с.
4. *Кузнецов А. Л.* Матричный метод поиска путей на взвешенных ориентированных графах в задачах сетевого планирования при проектировании и эксплуатации морских портов / А. Л. Кузнецов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.
5. *Chen D. Z.* Developing algorithms and software for geometric path planning problems / D. Z. Chen // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. — 1996. — Vol. 28. — Is. 4es. — Pp. 18-es. DOI: 10.1145/242224.242246.
6. *Галкина В. А.* Построение кратчайших путей в ориентированном графе / В. А. Галкина // *Дискретная математика. Комбинаторная оптимизация на графах*. — М.: Издательство «Гелиос АРВ», 2003. — С. 75–94.
7. *Kröger M.* Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two-and three-dimensional polymeric systems / M. Kröger // *Computer physics communications*. — 2005. — Vol. 168. — Is. 3. — Pp. 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.
8. *Алексеев В. Е.* Глава 3.4. Нахождения кратчайших путей в графе / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов // *Графы. Модели вычислений. Структуры данных*. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2005. — С. 236–237.
9. *Abraham I.* Highway dimension, shortest paths, and provably efficient algorithms / I. Abraham, A. Fiat, A. V. Goldberg, R. F. Werneck // *Proceedings of the twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*. — Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. — Pp. 782–793. DOI: 10.1137/1.9781611973075.6.
10. *Abraham I.* A hub-based labeling algorithm for shortest paths in road networks / I. Abraham, D. Delling, A. V. Goldberg, R. F. Werneck // *Experimental Algorithms: 10th International Symposium, SEA 2011, Kolimpari, Chania, Crete, Greece, May 5–7, 2011. Proceedings 10*. — Springer Berlin Heidelberg, 2011. — Pp. 230–241. DOI: 10.1007/978-3-642-20662-7_20.
11. *Lee C. Y.* An algorithm for path connections and its applications / C. Y. Lee // *IRE transactions on electronic computers*. — 1961. — № 3. — Pp. 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.
12. *Федоренков А.* AutoCAD 2002: практический курс / А. Федоренков, А. Кимаев. — М.: «ДЕСС КОМ», 2002. — 576 с.
13. *Кузнецов А. Л.* Инструмент расчета потребности в ресурсах контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, Н. Оја, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 659–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-659-669.

REFERENCES

1. Bellman, Richard. "On a routing problem." *Quarterly of applied mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
2. Dijkstra, E. W. "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische Mathematik* 1 (1959): 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
3. Evstigneev, V. A. *Iterativnye algoritmy global'nogo analiza grafov. Puti i pokrytiya*. Edited by A. P. Ershov. M: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1985.
4. Kuznetsov, Aleksandr L. "Matrix method for finding the paths on weighted oriented graphs in the tasks of port net operational planning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.

5. Chen, Danny Z. “Developing algorithms and software for geometric path planning problems.” *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28.4es (1996): 18-es. DOI: 10.1145/242224.242246.
6. Galkina, V. A. “Postroenie kratchaishikh putei v orientirovannom grafe.” *Diskretnaya matematika. Kombinatornaya optimizatsiya na grafakh*. M.: Izdatel'stvo “Gelios ARV”, 2003. 75–94.
7. Kröger, Martin. “Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two- and three-dimensional polymeric systems.” *Computer physics communications* 168.3 (2005): 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.
8. Alekseev, V. E., and V. A. Talanov. “Glava 3.4. Nakhozhdeniya kratchaishikh putei v grafe.” *Grafy. Modeli vychislenii. Struktury dannykh*. Nizhnii Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gos. universiteta, 2005. 236–237.
9. Abraham, Ittai, Amos Fiat, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. “Highway dimension, shortest paths, and provably efficient algorithms.” *Proceedings of the twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. 782–793. DOI: 10.1137/1.9781611973075.6.
10. Abraham, Ittai, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. “A hub-based labeling algorithm for shortest paths in road networks.” *Experimental Algorithms: 10th International Symposium, SEA 2011, Kolimpari, Chania, Crete, Greece, May 5–7, 2011. Proceedings 10*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 230–241. DOI: 10.1007/978-3-642-20662-7_20.
11. Lee, Chin Yang. “An algorithm for path connections and its applications.” *IRE transactions on electronic computers* 3 (1961): 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.
12. Fedorenkov, A., and A. Kimaev. *AutoCAD 2002: prakticheskii kurs*. M.: «DESS KOM», 2002.
13. Kuznetsov, Aleksandr L., Hannu Oja, and Anton D. Semionov. “Tool for assessing the resources requirement of a container terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 659–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-659-669.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuznetsov, Aleksandr L. —
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: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2023 г.
Received: September 30, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970

STATISTICAL ANALYSIS OF OIL AND OIL PRODUCT SPILLS AT SEA

D. V. Alekseev, A. A. Lentarev

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

The influence of oil and its derivatives transportation processes, especially against the background of positive dynamics of their production, on the probability of environmental pollution is considered in the paper. It is noted that in such conditions it is very important to ensure timely preparedness for response and the ability to choose the most effective strategies, mainly using preventive measures to ensure emergency preparedness. The basis for the necessary set of measures is a forecast of the potential volume of a spill, allowing only the necessary number of technical or other assets to be planned for each area. It is emphasised that such a forecast is possible if the type of distribution by which it is described is understood. The type of distribution that best describes the behaviour of the oil spill volume as a random variable is defined in the paper. Statistical analysis methods have been used to examine the data presented in various databases. It is found that none of the common distributions that could theoretically describe the spill volume behaviour fulfil the accuracy condition. The observed chi-square (Pearson) criterion of agreement absolutely for all types of distributions exceeds the critical one many times, and it is obvious that the lognormal distribution law describes the behaviour of the considered random variable in the best way, which is visually confirmed by the frequency polygon and the smallest observed Pearson criterion. Using modern methods of hybridisation of distributions, it is proposed to conduct a study aimed at creating a universal distribution, presumably based on the lognormal distribution, which would accurately describe the behaviour of the random variable of oil spill volume. In addition, an approximate step function with a very high confidence coefficient can be used to predict the volume in each specific area.

Keywords: marine transport, oil spills, data bases, oil spills statistics, oil spill probability, trend line, hybridization of distributions.

For citation:

Alekseev, Dmitrii V., and Alexander A. Lentarev. "Statistical analysis of oil and oil product spills at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 959–970. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970.

УДК 629.123+51.74

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МОРЕ

Д. В. Алексеев, А. А. Лентарёв

МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

В статье рассмотрено влияние процессов транспортировки нефти и ее производных, особенно на фоне положительной динамики их добычи, на вероятность загрязнения окружающей среды. Отмечается, что в таких условиях очень важно обеспечить своевременную готовность к реагированию и возможность выбора наиболее эффективных стратегий, преимущественно с использованием превентивных мер, позволяющих обеспечить готовность к аварийной ситуации. Основой необходимого комплекса мер является прогноз возможного объема разлива, позволяющий запланировать для каждого района только необходимое количество технических или иных средств. Подчеркивается, что составление подобного прогноза возможно при понимании вида распределения, при помощи которого он описывается. В данной работе выполнено определение вида распределения, который оптимальным образом описывает поведение объема аварийного разлива нефти как случайной величины. Для исследования данных, представленных в различных базах, использованы методы статистического анализа. Путем проведенного анализа было установлено, что ни один из общих видов распределения, которые теоретически могли бы описывать поведение объема при разливе, не выполняют условия точности. Наблюдаемый критерий согласия хи-квадрат (Пирсона) абсолютно для всех видов распределений многократно превышает критический, при этом очевидно, что наилучшим образом

поведение рассматриваемой случайной величины описывает логнормальный закон распределения, что визуально подтверждается полигоном частот и наименьшим наблюдаемым критерием Пирсона. Используя современные методы гибридизации распределений, предлагается провести исследование, направленное на создание универсального распределения, предположительно на базе логнормального, которое предельно точно описывает поведение случайной величины объема при разливе нефти. Кроме того, для прогнозирования объема в каждой конкретной зоне допускается использование степенной функции, полученной методом аппроксимации и обладающей весьма высоким коэффициентом достоверности.

Ключевые слова: морской транспорт, разливы нефти, базы данных, статистика разливов, вероятность разливов, линия тренда, гибридизация распределений.

Для цитирования:

Алексеев Д. В. Статистический анализ разливов нефти и нефтепродуктов на море / Д. В. Алексеев, А. А. Лентарёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 959–970. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970.

Введение (Introduction)

В настоящее время активное применение нефти и нефтепродуктов в различных отраслях промышленности имеет большое значение для мировой экономики. Несмотря на активные исследования в области альтернативных источников энергии нефть остается основным сырьем для производства синтетических материалов и различных видов топлива, а также является неотъемлемой частью многих промышленных процессов, играя ключевую роль в развитии различных отраслей экономики. При этом использование нефти сопряжено с определенным риском для окружающей среды, который возрастает с увеличением объемов добычи и потребления нефти и нефтепродуктов. Согласно статистическому обзору мировой энергетики, опубликованному Energy Institute в 2023 г., мировое производство нефти в 2022 г. практически приблизилось к показателям 2019 г. (до пандемии COVID-19), составив 4407,2 млн т [1]. Более того, согласно докладу «Перспективы мирового рынка нефти», опубликованному Организацией стран — экспортеров нефти (ОПЕК), к 2045 г. ожидается увеличение спроса на 12,9 млн барр./сут, что составит по сравнению с 2021 г. 109,8 млн барр./сут [2]. Такая тенденция обусловлена ростом потребностей развивающихся стран, что приведет к еще большим объемам транспортировки нефти и нефтепродуктов морским транспортом.

К сожалению, вследствие износа технических сооружений, аварий, неконтролируемых сбросов и утечек в ходе различных технологических процессов, часть нефти и нефтепродуктов попадает в окружающую среду. В таких условиях очень важно обеспечить своевременную готовность к реагированию и возможность выбора наиболее эффективных стратегий. Использованию превентивных мер при этом отводится не меньшая роль, поскольку реализация мероприятий, направленных на предотвращение разливов нефти и нефтепродуктов (РН), является ключевым положением, прописанным в ряде международных и национальных нормативно-правовых документов. Основой такого планирования является *прогноз разливов*, определяющий достаточность и обоснованность предусмотренных мер.

Особое значение прогнозирование приобретает при оценке номенклатуры и состава, предназначенных для борьбы с РН технических и иных средств. Правильный прогноз РН, т. е. оценка вероятности размеров и частоты разливов для каждого района, позволяет запланировать для него только необходимое количество средств. Составление такого прогноза возможно при понимании вида распределения объема РН. Все это в совокупности определяет актуальность и значение данного исследования для возможности прогнозирования вероятного объема РН в каждой конкретной ситуации.

Целью исследования является определение вида распределения объема РН на море. Для этого необходимо решить следующие задачи: выполнить анализ статистических данных по РН баз данных различных классификаций; определить возможность использования известных непрерывных распределений применительно к объему РН и выбрать распределение, оптимальным образом соответствующее эмпирическим данным.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В терминах теории оценки и управления рисками РН следует рассматривать как инцидент (происшествие), который является последним этапом в цепочке «*потенциальная опасность – реальная опасность – реализованная опасность*». В ноксологии эта последовательность в общем виде формализует некий процесс, называемый *развитием опасности* [3]. Этот процесс имеет вероятностный характер, а его результат является случайным событием, для описания которого применяются методы теории вероятностей. Следовательно, РН — случайное событие, возможность возникновения которого определяется его вероятностью $P_{РН}$. Анализ доступных библиографических источников, документов и материалов показывает, что для оценки $P_{РН}$ используется ряд методов, которые можно определить как аналитические, вероятностные, статистические и индексные.

Аналитические методы. Процесс развития опасности, результатом которого является РН, может быть представлен в виде некоторой имитационной модели, которая независимо от ее вида (физическая, динамическая, кинематическая и др.) описывается рядом переменных параметров: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Тогда $P_{РН}$ будет функцией этих переменных: $P_{РН} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Например, вероятность РН с танкера зависит от района плавания и плотности движения, конструкции и размерения судна, погодных условий, а также вида аварии судна. В общем случае при анализе РН в результате аварий, произошедших с судами, могут быть использованы аналитические модели, обзор которых дан в монографии [4]. С этой целью в данные модели могут быть внесены коэффициенты, учитывающие долю танкеров в общем составе судопотока и долю навигационных аварий, сопровождающихся РН с аварийных судов. Причем такие коэффициенты могут быть как постоянными параметрами, так и функциями других переменных (например, объем перевезенных нефти и нефтепродуктов, длительность плавания, размерения судна).

Вероятностные методы. Последовательные разливы, по сути, формируют поток случайных событий, имеющих случайную природу. Такой поток событий получил название *простейшего*, или *стационарного пуассоновского потока*, промежутки времени между событиями в котором имеют экспоненциальный характер [5]. Тогда, если последовательность РН в каком-либо районе рассматривать как простейший поток, то вероятность $P_{РН}(m)$ того, что за конкретный промежуток времени в этом районе произойдет m РН, рассчитывается по формуле Пуассона:

$$P_m = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где α — среднее количество РН за выбранный период времени;

$m!$ — факториал числа m ;

$e \approx 2,7182\dots$ — основание натурального логарифма.

Следовательно, вероятность того, что в течение выбранного периода времени произойдет один РН, составляет $P_{РН}(1) = \alpha e^{-\alpha}$. В принципе, последовательность РН может не обладать качествами простейшего потока. Тогда можно воспользоваться другим распределением, которое в большей степени отвечает реальной ситуации. Например, параметр α пуассоновского распределения с течением времени может изменяться. В этом случае последовательность РН может быть описана отрицательным биномиальным распределением, которое является одной из разновидностей распределения Паскаля. Следует отметить, что такие методы оценки $P_{РН}$, являясь по своей природе вероятностными, все же обладают также аналитическими признаками (законы распределения выражаются в виде формул) и статистическими элементами (например, коэффициенты и параметры в формулах распределения обычно рассчитываются с использованием статистических данных).

Статистические методы. Сущность этих методов основана на том, что РН представляет собой достаточно редкое событие, вероятность которого может быть оценена статистической частотой появления такого события в анализируемой области (портовые воды, район моря, компания, отрасль и т. д.). Применительно к РН статистическая частота n может быть соотнесена с каким-либо показателем N , характеризующим эксплуатационную деятельность в этой области. Тогда вероятность РН определяется в виде $P_{РН} = n/N$, где в качестве параметра N могут быть использованы такие

показатели, как количество судопроходов, общее количество танкеров или их доля в составе судопотока, объем движения (общая регистрационная вместимость всех судов), объем перевезенной нефти и нефтепродуктов. Обоснованность применения статистических методов оценки вероятности РН зависит от объема информации о реальных инцидентах. Для этого используются различные базы данных о РН, которые рассмотрены в разделе «Результаты».

Индексные методы. В таких методах диапазон изменения вероятности инцидента разбивается на несколько уровней, имеющих вербальное описание. Иногда каждому уровню присваивается количественный показатель (весовой коэффициент, или индекс частоты). Подразделение на уровни вероятности и выбор количественных показателей выполняются на основе экспертной оценки, поэтому такие методы можно назвать также *экспертными*.

Индексные методы оценки вероятности инцидентов используются в том случае, если риск измеряется в матричной форме. В самом простом варианте шкала вероятностей разбивается на три уровня: низкий, средний и высокий. Такая система оценки применяется, например, в ГОСТе Р 12.0.10–2009 «Системы управления охраной труда. Определение опасностей и рисков»¹.

В «Руководстве по формализованной оценке безопасности» [6], рекомендуемом ИМО к использованию при анализе рисков судовых операций, предлагается четырехуровневая индексная шкала оценки безопасности: «часто», «вполне вероятно», «маловероятно» и «крайне маловероятно». Индексные методы оценки вероятности РН часто встроены в процедуры оценки и управления рисками, особенно при разработке планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти. В этом случае применяются до семи уровней оценки вероятности. Так, в Национальном плане по ликвидации разливов нефти на море Австралии использовано пять уровней оценки вероятности (как и риска) РН: «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий» и «экстремальный».

Иногда границы уровней оценки вероятности происшествий определяются на основе конкретных количественных показателей, полученных на основе статистических методов. Так, в РД 03–418–01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» определены пять уровней вероятности возникновения опасных происшествий: «частые события», «вероятные события», «возможные события», «редкие события» и «практически невероятные события». Указанные уровни охватывают диапазон вероятностей происшествий от 1 и более за год до 10^{-6} и менее и разделяются значениями, кратными 10^{-2} .

Помимо оценки вероятности РН для эффективной работы системы предупреждения и ликвидации РН необходимо выполнять анализ возможных объемов РН, который позволяет определить количество и состав необходимых ресурсов. В планах предупреждения и ликвидации РН любого уровня, от объектового до регионального, обязательным является раздел, в котором определяются прогнозируемые зоны распространения нефти и нефтепродуктов. Размеры этих зон в основном зависят от объема разлитой нефти или нефтепродукта. В настоящее время прогноз зон распространения выполняется для максимально возможных разливов, объемы которых устанавливаются нормативно в зависимости от характеристик объекта. В то же время правомерным является и другой подход, когда количество и состав сил и средств ликвидации РН для первоначального реагирования могут быть определены исходя из среднего или наиболее вероятного объема РН. Для этого необходимо определить вид и параметры функции распределения разливов по их объему. Наличие такой функции, записанной в аналитическом виде, позволяет вычислять объем разлива нефти с любой заданной степенью вероятности.

Для анализа распределения РН по объему можно воспользоваться информацией, полученной из существующих статистических баз данных, которые в работе [7] классифицированы по различным признакам. Для этих целей было выбрано несколько баз данных из категорий международных, национальных и корпоративных баз, содержащих информацию только по РН на море. Обработка данных выполнялась на основе стандартных методов статистического анализа: по данным базы

¹ ГОСТ Р 12.0.010–2009. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и рисков: национальный стандарт Российской Федерации: дата введ. 2009-12-10 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. офиц. М.: Стандартинформ, 2009. 20 с.

составлялись гистограммы распределения РН по объему, выдвигались и проверялись гипотезы распределения генеральной совокупности, методом наименьших квадратов находилась функция, наилучшим образом приближающая эмпирические данные.

Одной из прикладных задач математической статистики является установление теоретического закона распределения случайной величины, характеризующей изучаемый признак по эмпирическому распределению, которое представляет вариационный ряд. Первый этап, заключающийся в предположении возможного вида закона распределения, можно выполнить на основе визуального анализа полигона или диаграммы. Таким образом, необходимо проанализировать информацию, представленную в базе данных Береговой охраны США, где за период 1973–2023 гг. представлены данные о количестве и объеме РН, среднем, медианном и максимальном объемах РН, произошедших в территориальных водах [8]. Следует отметить, что в течение всего времени наблюдений количество разливов в диапазоне 1–100 галлонов составило более 88,6 % от общего числа разливов, и тенденция увеличения доли таких разливов при уменьшении их среднего объема наблюдается до настоящего времени. Для наглядности визуализации рассмотрим статистические данные за 1974 г. по разливам нефти (рис. 1). В целях упрощения восприятия графических данных и учитывая, что всего 0,6 % всех разливов в течение анализируемого года превысило 10,000 галлонов, при построении диаграммы такие разливы не учитывались.

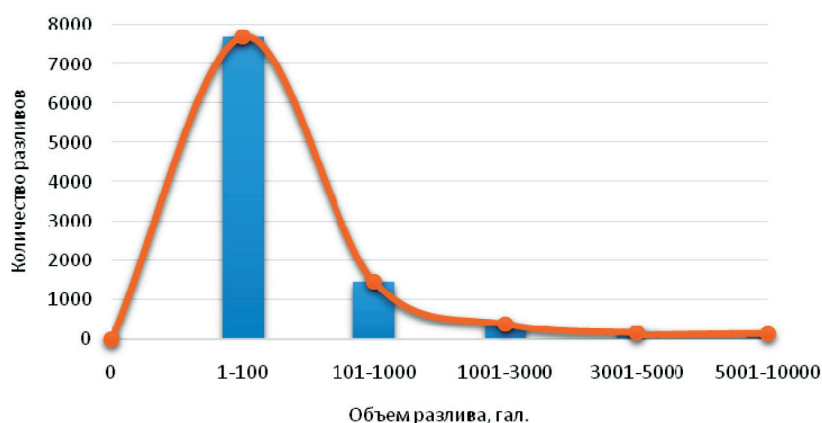


Рис. 1. Распределение разливов нефти по объему за 1974 г., произошедших в территориальных водах США (база данных Береговой охраны США)

Выполним анализ построенной кривой распределения объема РН. Из графика видно, что наблюдается явная асимметрия и положительная правосторонняя «скошенность», означающая обычно, что большее расстояние от математического ожидания соответствует более низкой вероятности. На основе визуального анализа можно сделать предположение о том, что описывать распределение объема РН могут такие виды распределения, как логнормальное, Вейбулла и гамма-распределение. Как известно, на объем РН в результате аварии оказывает влияние множество случайных и независимых факторов, таких как месторасположение повреждения, его глубина, особенности конструкции и состояние корпуса судна, свойства перевозимой нефти и др. Поэтому вторым этапом после визуального анализа является установление теоретического закона распределения посредством влияния этого множества факторов на случайную величину. С этой целью было сформулировано четыре основных фактора, имеющих непосредственное отношение к проводимому исследованию.

1. *Влияние множества случайных и независимых факторов на объем РН происходит одновременно и независимо друг от друга.* Результатом такого одновременного воздействия на процесс большого количества независимых случайных факторов является случайная величина, имеющая нормальный закон распределения. Такой вид распределения, который характеризуется непрерывным распределением вероятностей с пиком в центре и симметричными боковыми сторонами, в одномерном случае задается функцией плотности вероятности, совпадающей с функцией Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2},$$

где μ — математическое ожидание (среднее значение), медиана и мода распределения;

σ — среднеквадратичное отклонение;

σ^2 — дисперсия распределения.

2. *Перемножение воздействий каждого из случайных и независимых факторов, т. е. мультипликативный характер взаимодействия.* В данном случае можно выдвинуть гипотезу о том, что случайная величина объема РН имеет логнормальный закон распределения, функция плотности распределения вероятности которого имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2},$$

где μ и σ — параметры логнормального распределения.

3. *Воздействие одного или нескольких случайных и независимых факторов из большого их числа, влияющего на случайную величину объема разлива, значительно превосходит по силе воздействия все остальные факторы.* Распределение такой случайной величины приобретает положительную асимметрию и называется *гамма-распределением*. Плотность вероятности такого распределения выражена формулой

$$f(x) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, x \geq 0,$$

где k — параметр формы;

θ — параметр масштаба;

$\Gamma(k)$ — гамма-функция Эйлера.

Популярность рассматриваемого распределения обусловлена гибкостью и многообразием параметров, применимых к тому или иному набору исходных данных.

4. *Случайное событие разлива нефти как следствие последовательных взаимозависимых случайных событий.* Цепочку этих событий в общем виде можно записать следующим образом: *неисправность (отказ) → обнаружение утечки → принятие мер по устранению утечки → объем разлива*. Для описания отказов таких многокомпонентных систем используют экспоненциальное распределение или более общее — распределение Вейбулла. При этом закон распределения случайных событий, составляющих цепочку, может быть каким угодно [9]. Учитывая, что график распределения РН по объему имеет правостороннюю скошенность с максимумом функции, т. е. параметр формы распределения $k > 0$, экспоненциальное распределение, при котором $k = 1$, не подходит для цели настоящего исследования. Таким образом, для аппроксимации статистических данных о разливах нефти можно выбрать распределение Вейбулла, функция плотности вероятности которого имеет вид:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, x \geq 0,$$

где λ — параметр масштаба распределения, характеризующий растянутость кривых вдоль оси x ;

k — параметр формы распределения.

Универсальность распределения обусловлена возможностью варьирования этих двух параметров, что позволяет весьма гибко моделировать различные функции.

Результаты (Results)

Для целей настоящего исследования были выбраны две базы данных, в которых наиболее полно отражена статистическая информация и которые являются весьма интересными с приклад-

ной точки зрения. Первой является база данных компании ВР (до мая 2001 г. British Petroleum), в которой собрана корпоративная информация о разливах нефти, произошедших на объектах компании, в основном на нефтяных платформах и буровых вышках [10], вторая база данных относится к Национальному управлению океанических и атмосферных исследований, которое является высоконаучным учреждением при Министерстве торговли США [11]. Необходимо отметить, что Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) применяет самые передовые технологии и методы для контроля за РН. С помощью спутников организация непрерывно сканирует поверхность планеты, собирая все необходимые данные, после сложной алгоритмической обработки которых происходит создание визуального представления путем наложения этих данных на экологические карты.

Перед началом исследования по подтверждению или опровержению гипотезы о том или ином виде распределения были заданы следующие условия:

- 1) значение объема разлива может принимать только неотрицательные значения;
- 2) нулевому значению объема разлива свойственна нулевая вероятность, поскольку разлив считается достоверным событием;
- 3) разливы объемом свыше 5000 л для базы данных ВР и 200 тыс. галл. для базы данных NOAA не были учтены, так как их частота минимальна (имеет небольшой вес в генеральной совокупности выборки).

Кроме того, при группировке данных использовалось *правило Стерджеса* для определения оптимального количества интервалов, на которые разбивается наблюдаемый диапазон изменения случайной величины при построении гистограммы плотности распределения. Длины интервалов при этом были определены как равные. На рис. 2 приведены графики полигонов эмпирического и теоретического распределения, выполненные на основе статистических данных ВР.

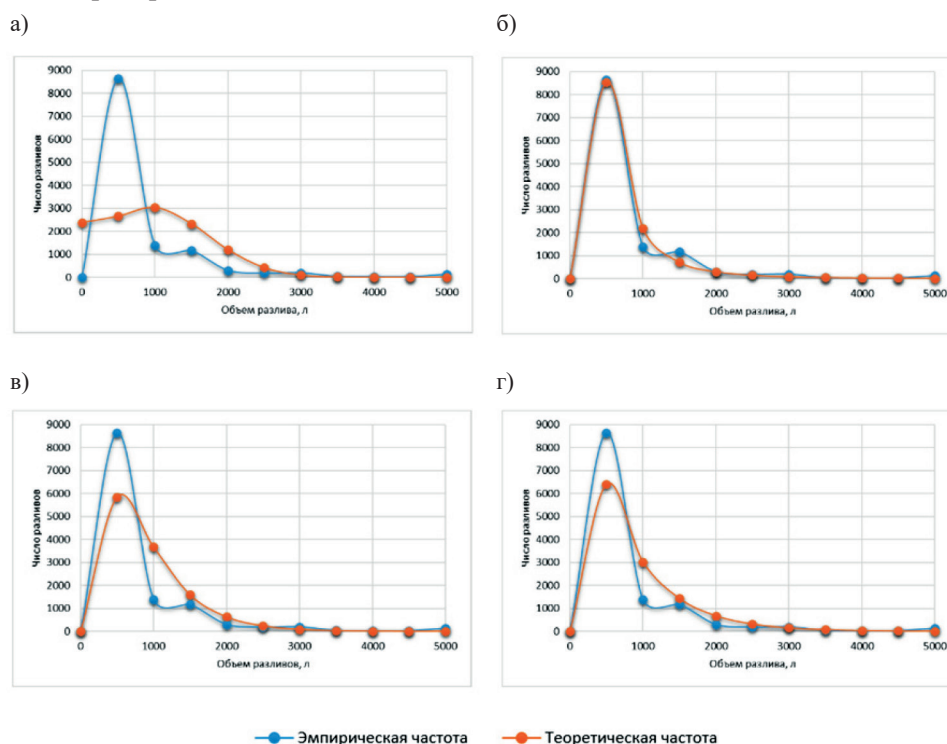


Рис. 2. Полигоны частот для вероятных видов распределения (база данных ВР):
а — нормальное распределение; б — логнормальное распределение;
в — гамма-распределение; г — распределение Вейбулла

На рис. 3 на графиках показаны полигоны эмпирического и теоретического распределения, выполненные на основе статистических данных NOAA.

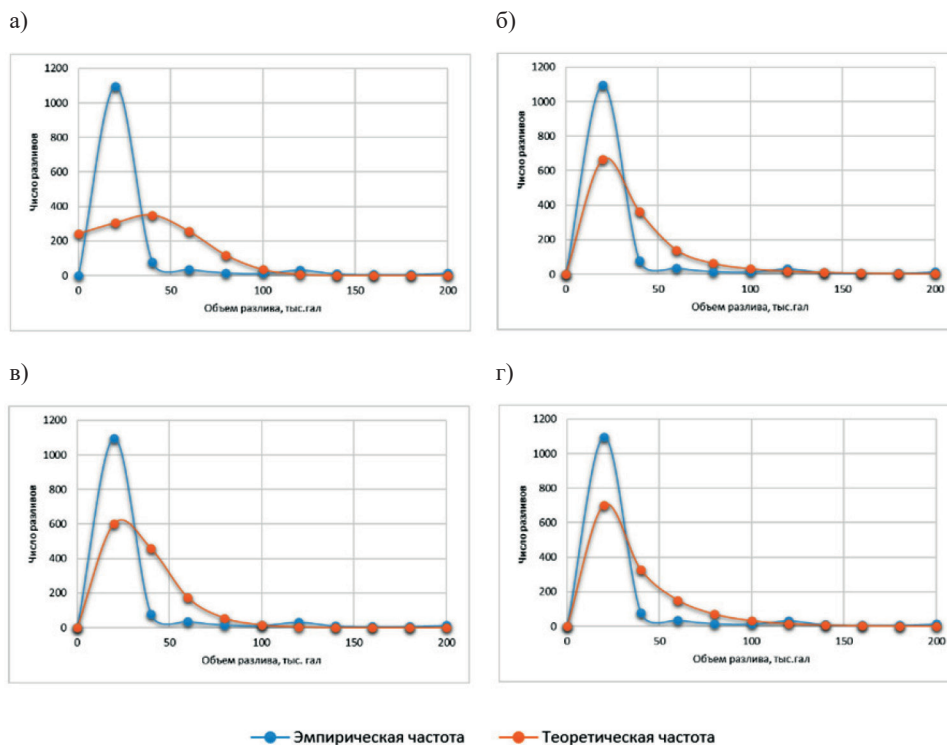


Рис. 3. Полигоны частот для вероятных видов распределения (база данных NOAA):
а — нормальное распределение; б — логнормальное распределение;
в — гамма-распределение; г — распределение Вейбулла

Дальнейшая задача заключается в оценке точности описания экспериментальных данных выбранным теоретическим законом распределения. Для решения данной задачи при большом объеме выборки ($n > 100$) используется критерий согласия — хи-квадрат (Пирсона), позволяющий оценить значимость различий между эмпирическим количеством исходов, попадающих в каждую категорию, и теоретическим количеством, которое можно ожидать в изучаемых группах при справедливости нулевой гипотезы. Результаты такой оценки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка соответствия эмпирических данных теоретическим по критерию Пирсона

Название базы данных	Предполагаемый вид распределения	Критерий χ^2 наблюдаемый	Критерий χ^2 критический	P -value
BP	Нормальное	21384,9	14,1	0
	Гамма	7281,4	14,1	0
	Вейбулла	5873,84	14,1	0
	Логнормальное	4481,6	14,1	0
NOAA	Нормальное	3341,7	14,1	0
	Гамма	1505,5	14,1	0
	Вейбулла	1007,0	14,1	0
	Логнормальное	669,4	14,1	0

Кроме определения вида распределения, характерного для всех статистических баз данных, правомерно выполнение прогнозирования путем выявления общей тенденции на основе имеющихся статистических данных для каждой конкретной базы данных. Такой прогноз может быть осуществлен в Excel в графическом виде. В его основу заложен метод наименьших квадратов с использованием аппроксимирующей кривой — линии тренда. Подбирая линию тренда, программа автоматически выполняет расчет значения величины коэффициента аппроксимации R^2 , характеризующего ее достоверность. В итоге чем ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия тренда линеализирует исследуемый процесс. Результаты такой аппроксимации для баз данных ВР, Береговой Охраны США и NOAA приведены в табл. 2.

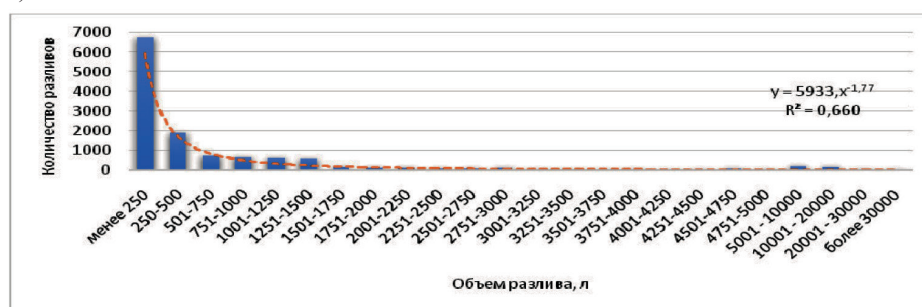
Таблица 2

Результаты аппроксимации рассматриваемых статистических данных

Вид линии тренда	Пределы изменения R^2	Качественная характеристика достоверности
Линейная	0,2607–0,3561	Слабая
Экспоненциальная	0,5717–0,9009	Заметная, высокая
Логарифмическая	0,5755–0,6190	Заметная
Степенная	0,9944–1,000	Весьма высокая, абсолютная

Степенная аппроксимация, приведенная на рис. 4, показала наиболее высокий коэффициент достоверности по всем анализируемым базам данных.

а)



б)



в)

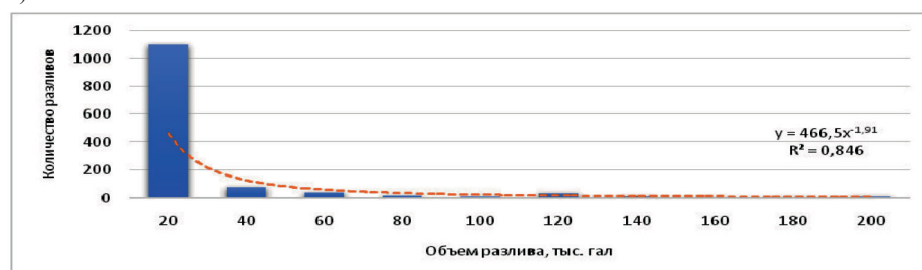


Рис. 4. Степенная линия тренда для гистограмм баз данных:
а — компания ВР; б — Береговая охрана США; в — NOAA

Обсуждение (Discussion)

Полученные в ходе настоящего исследования результаты свидетельствуют о том, что ни один из общих видов распределения точно не описывает распределение случайного объема РН. Необходимо отметить, что для обеих рассматриваемых баз данных наблюдается один и тот же результат. Выводы, опубликованные в работе [8] о том, что случайная величина объема РН при транспортировке имеет нормальный закон распределения, не подтверждаются. Известно, что для подтверждения или опровержения нулевых гипотез существуют косвенные, графические и расчетные методы. Если гипотеза отвергается хотя бы по одному из косвенных методов, то отвергается и нулевая гипотеза. Так, например, в теории вероятности доказано, что каждому закону распределения свойственно определенное соотношение между коэффициентами асимметрии и эксцесса. Для нормального закона распределения абсолютная величина показателей асимметрии и эксцесса должна быть меньше их стандартных ошибок в три и более раза. В данном случае наблюдается диаметрально противоположная ситуация: стандартные ошибки асимметрии и эксцесса больше их абсолютных значений в десятки раз, поэтому гипотеза о нормальном распределении отвергается.

Наблюдаемый критерий согласия для всех видов распределений многократно превышает критический, свидетельствуя о неслучайном и значимом отличии эмпирических и теоретических частот. При этом очевидно, что логнормальный закон распределения среди всех остальных наилучшим образом описывает поведение рассматриваемой случайной величины, что визуально подтверждается полигоном частот и наименьшим наблюдаемым критерием Пирсона.

Преимущество использования основных законов распределения состоит в их детальной изученности и наличии возможности получения непротиворечивых, несмещенных и относительно высокоэффективных оценок параметров. Несмотря на это рассмотренные законы распределения не обладают необходимыми гибкостью и разнообразием форм, поэтому их применение не обеспечивает необходимой общности представления случайной величины объема при аварийном РН.

С учетом того, что наличие аналитической функции, описывающей вероятный объем РН, имеет большое значение для эффективного планирования состава сил и средств ликвидации РН, предлагается использовать методы, позволяющие генерировать более гибкие распределения. Так, в работе [12] рассматривается один из таких методов генерации семейств непрерывных распределений. Суть его заключается в том, что случайная величина X , являясь своеобразным «трансформатором», используется для преобразования другой случайной величины T . Полученное семейство распределений $T-X$ имеет связь с интенсивностью отказов, и каждое найденное при этом распределение рассматривается как взвешенная функция интенсивности отказов случайной величины X . Метод получил развитие во многих работах. Например, в работе [13] была разработана и исследована схема обобщения семейства $T-X$, получившая название $T-R-Y$. Суть схемы заключается в том, что T , R и Y , являясь различными распределениями, используются для образования распределения с большей гибкостью X , обладающего всеми преимуществами T , R и Y .

Используя данный подход, предлагается провести исследование, направленное на создание такого универсального распределения, предположительно на базе логнормального, которое предельно точно могло описать поведение случайной величины объема при РН. Кроме того, для прогнозирования объема в каждой конкретном районе допускается использование степенной функции, полученной методом аппроксимации и обладающей весьма высоким коэффициентом достоверности.

Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования, направленного на определение вида распределения объема РН на море, можно сделать следующие выводы:

1. Ни одно из таких распределений, как нормальное, логнормальное, Гаусса и Вейбулла точно не описывает распределение случайной величины объема РН.
2. Среди всех рассмотренных типовых видов распределений логнормальный закон наилучшим образом описывает поведение случайной величины объема РН, что визуально подтверждается полигоном частот и наименьшим наблюдаемым критерием Пирсона.

3. Типовые законы распределения не обладают необходимыми гибкостью и разнообразием форм, поэтому их применение не обеспечивает необходимой общности представления случайной величины объема при аварийном РН.

4. Для прогнозирования объема РН в каждом конкретном районе допускается использование степенной функции, полученной методом аппроксимации и обладающей весьма высоким коэффициентом достоверности.

5. С учетом того, что наличие аналитической функции, описывающей вероятный объем РН, имеет большое значение для эффективного планирования состава сил и средств ликвидации РН, предлагается провести дальнейшее исследование, направленное на создание универсального распределения. Такая модель распределения, созданная на базе логнормального с использованием методом гибридизации, позволит точно описать поведение случайной величины объема при разливе нефти.

6. Дальнейшие исследования в указанном направлении могут содействовать уменьшению числа РН, а, соответственно, снижению негативного воздействия на морскую среду и обеспечению устойчивости развития морской транспортной и нефтегазовой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy Institute: Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.energyinst.org/statistical-review/> (дата обращения: 07.09.2023).

2. Официальный сайт Организации стран — экспортеров нефти [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm/ (дата обращения: 07.09.2023).

3. Белов С. В. Ноксология: учебник и практикум для вузов / С. В. Белов, Е. Н. Симакова; под общей редакцией С. В. Белова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2023. — 451 с.

4. Лентарев А. А. Основы теории управления движением судов: монография / А. А. Лентарев. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2018. — 197 с.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель. — 11-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2010. — 664 с.

6. Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018. — London: IMO, 2019. — 74 p.

7. Алексеев Д. В. Сравнительный анализ баз данных по разливам нефти и нефтепродуктов с морских судов / Д. В. Алексеев, А. А. Лентарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 891–904. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-891-904.

8. Polluting Incidents In and Around U. S. Waters. A Spill/Release Compendium: 1969–2011. — Washington DC: United States Coast Guard, 2013.

9. Этин В. Л. Стохастическая оценка массы разливов нефти с судов и объектов внутреннего водного транспорта / В. Л. Этин, С. В. Васькин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2011. — № 29. — С. 152–161.

10. Лентарев А. А. Проблемы прогнозирования риска разливов нефти на море. Монография / А. А. Лентарев, С. Ю. Монинцев. — Владивосток: Гос. морской ун-т им. адмирала Г. И. Невельского, 2006. — 122 с.

11. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills/> (дата обращения: 08.07.2023).

12. Alzaatreh A. A new method for generating families of continuous distributions / A. Alzaatreh, C. Lee, F. Famoye // Metron. — 2013. — Vol. 71. — Is. 1. — Pp. 63–79. DOI: 10.1007/s40300-013-0007-y.

13. Aljarrah M. A. On generating TX family of distributions using quantile functions / M. A. Aljarrah, C. Lee, F. Famoye // Journal of Statistical Distributions and Applications. — 2014. — Vol. 1. — Pp. 1–17. DOI: 10.1186/2195-5832-1-2.

REFERENCES

1. Energy Institute: Official website. Web. 7 Sept. 2023 <<https://www.energyinst.org/statistical-review/>>.
2. Organization of the Petroleum Exporting Countries: Official website. Web. 7 Sept. 2023 <https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm/>.
3. Belov, S. V., and E. N. Simakova. *Noksologiya: uchebnik i praktikum dlya vuzov*. Edited by S. V. Belov. 3d edition. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2023.
4. Lentarev, A. A. *Osnovy teorii upravleniya dvizheniem sudov: monografiya*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2018.
5. Venttsel', E. S. *Teoriya veroyatnostei*. 11th edition. M.: KNORUS, 2010.
6. *Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018. London: IMO, 2019.
7. Alekseev, Dmitrii V. and Alexander A. Lentarev. "Comparative analysis of databases on oil and petroleum products spills from ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.6 (2022): 891–904. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-891-904.
8. *Polluting Incidents In and Around U. S. Waters. A Spill/Release Compendium: 1969–2011*. Washington DC: United States Coast Guard, 2013.
9. Etin, V. L., and S. V. Vas'kin. "Stochastic estimation of weight spills of oil from courts and objects internal sailing charter." *Bulletin of VSAWT* 29 (2011): 152–161.
10. Lentarev, A. A., and S. Yu. Moninets. *Problemy prognozirovaniya riska razlivov nefti na more*. Vladivostok: Gos. morskoi un-t im. admiral G. I. Nevel'skogo, 2006.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Official website. Web. 8 Jul. 2023 <<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills/>>.
12. Alzaatreh, Ayman, Carl Lee, and Felix Famoye. "A new method for generating families of continuous distributions." *Metron* 71.1 (2013): 63–79. DOI: 10.1007/s40300-013-0007-y
13. Aljarrah, Mohammad A., Carl Lee, and Felix Famoye. "On generating TX family of distributions using quantile functions." *Journal of Statistical Distributions and Applications* 1 (2014): 1–17. DOI: 10.1186/2195-5832-1-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеев Дмитрий Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
Лентарёв Александр Андреевич
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: alexeevdmityy97@mail.ru
Лентарёв Александр Андреевич —
доктор технических наук, профессор
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: lentarev@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alekseev, Dmitrii V. — Postgraduate
Supervisor:
Lentarev, Alexander A.
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: alexeevdmityy97@mail.ru
Lentarev, Alexander A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: lentarev@msun.ru

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.
Received: September 21, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986

LABORATORY STUDIES OF THE SOIL EROSION AND ALLUVIUM PROCESSES IN THE AREA OF BRIDGE SUPPORTS

K. P. Morgunov, Yu. K. Ivanovsky, V. G. Bogatyrev

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

The results of experimental studies of the process of bottom erosion during the construction of bridge supports under the protection of a sheet pile structure are presented. To protect the sheet piling box from the influence of ice floes during the period of ice drift, it is planned to install an ice-cutting protective device located upstream of the sheet piling box. In the process of conducting research, the principles of modeling the processes of river sediment transport taking into account the size of transported particles, non-erosive velocities and channel slopes are substantiated. Laboratory studies of the processes of forming erosion and alluvium are carried out for two cycles of parameters. At the same time, the influence of the ice-cutting device position relative to the sheet piling box on the amount of erosion and alluvium is studied. Experiments were carried out for various options of the ice cutter position relative to the sheet piling box; the ice cutter moved upstream along the axis of the tray with a step of 0.1 m (5 m for natural conditions). Based on measurements of bottom surface marks, two-dimensional erosion plans are constructed. For several options for the location of structures, the trajectories and directions of flow movement are determined by photographing the movement of surface floats, which makes it possible to create a grid of streamlines and determine the values of surface current velocities. An analysis of the velocity distribution over the surface and in the flow volume has shown that a horseshoe-shaped vortex is formed around the structure, with riffles and ridges appearing along its wings. A stagnation zone is established inside the "horseshoe"; in this zone the bottom remains relatively smooth. In the absence of an ice cutter, the main zones of soil erosion arise in the vicinity of the corners of the front face of the box, and alluviums form in the rear part of the structure. When installing an ice-cutting device in the shape of a triangle in front of the box, directed at an acute angle towards the oncoming flow, the erosion zones move to the vicinity of the corners lying at the base of the triangular ice cutter facing the box. The absolute values of erosion depth and alluvium height are reduced compared to the option without the ice cutter. When the ice cutter moves upstream relative to the box, a washout zone appears in the gap between the ice cutter and the box. The maximum values of erosion and alluvium occur in the absence of ice cutter and when placing the ice cutter at a distance of 200–300 mm from the box. The minimum values of erosion and alluvium are recorded when the ice cutter is placed close to the support box. With increasing flow rates and depths, the values of erosion and alluvium increase. Installing the ice-cutting device improves the hydraulic conditions of flow around the sheet piling box structure, which leads to a decrease in washout depths.

Keywords: bridge supports, ice cutting devices, alluviums and bottom erosions, laboratory hydraulic studies, bottom relief.

For citation:

Morgunov, Konstantin P., Yuri K. Ivanovsky, and Vladislav G. Bogatyrev. "Laboratory studies of the soil erosion and alluvium processes in the area of bridge supports." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 971–986. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986.

УДК 627

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗМЫВА И НАМЫВА ГРУНТА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ МОСТОВЫХ ОПОР

К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, В. Г. Богатырёв

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

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса размыва дна при строительстве мостовых опор под защитой шпунтовой конструкции и ледорезного устройства. Обоснованы принципы

моделирования процессов переноса речных наносов с учетом размеров переносимых частиц. Выполнены лабораторные исследования процессов формирования размывов и намывов для двух циклов параметров. Выполнена оценка влияния на величину размывов и намывов положения ледорезного устройства относительно шпунтового короба — ледорез располагался на различных расстояниях от шпунтового короба с шагом 0,1 м (5 м для натурных условий). Для нескольких вариантов расположения конструкций определены траектории и направления движения потока, что позволило составить сетку линий тока и определить значения поверхностных скоростей течения. Анализ распределения скоростей по поверхности и в объеме потока показал, что вокруг конструкции формируется подковообразный вихрь, вдоль крыльев которого на дне формируются рифели и гряды. Внутри «подковы» была установлена зона застоя с относительно гладким дном. При отсутствии ледореза основные зоны размыва грунта возникают в окрестности углов фронтальной грани короба, в тыловой части конструкции формируются намывы. При установке ледореза в форме треугольника, направленного острым углом навстречу набегающему потоку, зоны размывов перемещаются в окрестности углов основания ледореза, обращенных к коробу. При перемещении ледореза относительно короба вверх по потоку возникает зона намыва в промежутке между ледорезом и коробом. Максимальные значения размыва и намыва возникают при отсутствии ледореза и при его размещении на расстоянии 200–300 мм от короба. Минимальные значения размыва и намыва зафиксированы при размещении ледореза вплотную к коробу опоры. Установка ледорезного устройства улучшает гидравлические условия обтекания конструкции шпунтового короба, что приводит к уменьшению глубин размывов.

Ключевые слова: мостовые опоры, ледорезные устройства, намывы и размывы дна, лабораторные гидравлические исследования, рельеф дна.

Для цитирования:

Моргунов К. П. Лабораторные исследования процессов размыва и намыва грунта в районе размещения мостовых опор / К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, В. Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 971–986. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986.

Введение (Introduction)

Мостовые переходы через судоходные реки, как и другие сооружения, возводимые в руслах рек, оказывающие воздействие на гидравлику потока и условия перемещения наносов в русле, представляют собой определенное ограничение для судоходства [1], [2]. Возведение в русле реки мостовых опор приводит к изменению урочной и скоростной структуры потока, что может вызывать появление свальных течений и нежелательные деформации дна [3]. Известно, что в ходе строительства и эксплуатации мостовых переходов через водные преграды вблизи плохо обтекаемых тел (опор) под действием течения происходит размыв грунта [4], [5]. Методика расчета размывов у опор изложена в ряде нормативных и справочных документов^{1,2,3}. Гидравлико-гидрологический расчет размывов у опор строящегося моста выполняется на этапе проектирования.

Работы по устройству мостовых опор, как правило, выполняются под защитой шпунтового короба в месте их расположения. С целью обеспечения работ в период ледохода для защиты шпунтового ограждения от повреждения и разрушения плывущими льдинами возможно устройство ледорезов, устанавливаемых выше по течению. Такие конструкции (шпунтовое водозащитное ограждение и ледорезная конструкция) вносят изменения в структуру потока и структуру образования размывов в районе расположения мостовых опор. Для определения характера и структуры размывов и намывов на дне в районе расположения шпунтового ограждения и ледорезной конструкции специалистами ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова в 2022 г. был выполнен цикл лабораторных гидравлических исследований, описание и результаты которых представлены в настоящей статье.

Были сформулированы следующие задачи экспериментальных гидравлических исследований:

— определение характера и размеров размывов и намывов дна в районе размещения шпунтовой конструкции при различных параметрах обтекающего потока;

¹ СП 32-102-95 «Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов». Изд. офиц. М.: Корпорация «Трансстрой», 1996.

² Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). М., 1992.

³ Технические указания по расчету местного размыва у опор эксплуатируемых мостов / Утв. ЦП МПС России. М., 2001.

— определение влияния взаимного расположения ледореза и шпунтового ограждения на характер размывов и намывов на дне русла.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Процесс образования углублений размыва вблизи плохо обтекаемых тел обусловлен формированием и последующим развитием вихревых систем в основании обтекаемой конструкции вблизи ее сопряжения с дном и вихрей в следе обтекаемого тела [6], [7]. Независимо от формы мостовой опоры основным механизмом, вызывающим формирование и развитие размываемого углубления и оказывающим на него влияние, является *подковообразная вихревая система*, возникающая в основании опоры [8]–[10]. С приближением потока к обтекаемому телу формируется трехмерная картина течения (рис. 1).

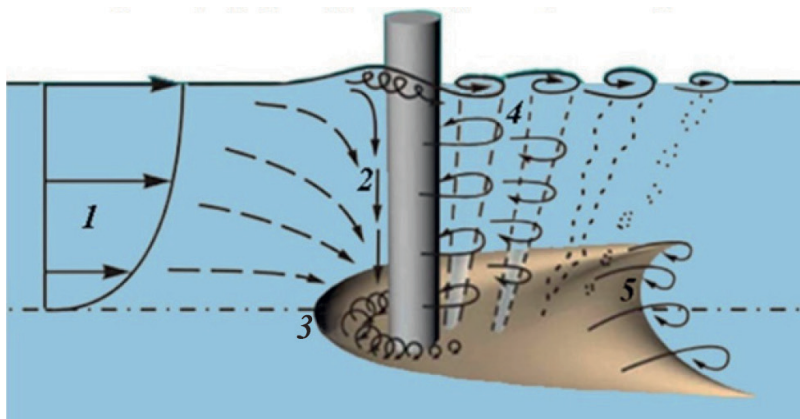


Рис. 1. Формирование размыва и намыва грунта вблизи опоры (авторская схема)

Набегающему на опору пограничному слою 1 приходится преодолевать значительный отрицательный градиент давления, возникающий вблизи фронтальной части опоры, что приводит к отрыву пограничного слоя от опоры. В передней (фронтальной) части опоры формируется направленное ко дну течение 2. У основания опоры возникает подковообразный вихрь 3. За опорой (в следе опоры) формируются вертикальные вихри 4, обусловленные отрывом потока от поверхности опоры (следные вихри). В результате взаимодействия отрывного и ниспадающего течений перед опорой, подковообразных и следных вихрей грунт перед опорой размывается, образуя позади нее намыв грунта 5 в виде дюн или рифелей.

Расположение, размер и интенсивность подковообразных вихрей существенным образом зависят от стадии их формирования и изменяются во времени. Структура подковообразной вихревой системы весьма существенно зависит от числа Рейнольдса: $Re = \frac{vb}{\nu}$ (здесь v — скорость набегающего потока, b — характерный поперечный размер опоры, ν — кинематический коэффициент вязкости воды) и характеристик пограничного слоя, формируемого перед обтекаемой преградой.

Следует отметить, что при больших числах Рейнольдса ($Re > 10\,000$) формируется устойчивый турбулентный режим обтекания опоры и характеристики подковообразной вихревой системы практически не зависят от числа Рейнольдса [11]. Очевидно, что на размываемой поверхности вблизи опоры частички грунта начинают перемещаться тогда, когда скорость потока, обусловленная вихревым движением, превышает критическую скорость переноса частичек (неразмывающую скорость). Существует несколько способов определения неразмывающих скоростей. Так, СП 32–102–95 для однородного несвязного грунта со средним диаметром частиц d (м) при глубине потока H (м) рекомендует определять неразмывающую скорость по формуле

$$v_{нр} = 1,15 \sqrt{g} (H d)^{\frac{1}{4}}; \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения.

В источнике [12] предлагается для определения неразмывающей скорости использовать эмпирическую формулу

$$v_{\text{нр}} = 6,19 H^{\frac{1}{6}} d_{50}^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где d_{50} — эффективный диаметр частиц грунта, составляющих не менее 50 % объема.

С началом перемещения частиц вблизи опор начинают формироваться размыв и намыв грунта. С течением времени глубина размыва грунта увеличивается и высота намыва растет. Установившийся режим, при котором форма и размеры размывов остаются практически постоянными, как показывают исследования [3], наступает, когда безразмерное время процесса $\left(\frac{v_{\text{нр}} t}{H}\right)$ будет соответствовать условию

$$\left(\frac{v_{\text{нр}} t}{H}\right) \geq 4 \cdot 10^4. \quad (3)$$

Лабораторные методы исследования и гидравлическое моделирование давно и широко используются в гидротехнической практике при проектировании, строительстве и эксплуатации различных речных инженерных сооружений [13]–[15]. Как правило, такие подходы применяются в случае невозможности или дороговизны выполнения натурных исследований, для оптимизации материальных и финансовых затрат, в целях обеспечения надежности и безопасности принимаемых инженерно-хозяйственных решений, не наносящих экологического ущерба окружающей среде. При разработке подходов к моделированию исходят из оценки физических факторов, определяющих ход исследуемых процессов, а также возможностей лабораторных установок. На основе таких оценок с использованием методов теории подобия определяются масштабы моделирования и характеристики модели.

В задачах движения реальной жидкости в открытых потоках подобие должно обеспечиваться равенством для модели и натуры критериев подобия Фруда: $Fr = \frac{v^2}{g L}$ и Рейнольдса: $Re = \frac{v L}{\nu}$,

где v — скорость, L — характерный размер, ν — кинематический коэффициент вязкости. Однако обеспечить одновременное равенство этих критериев при моделировании невозможно, так как необходимые условия подобия оказываются несовместимыми. Расчеты показывают, что для одновременного равенства для натуры и модели чисел Fr и Re для модели масштаба 1:50 необходимо использовать жидкость в 353 раза менее вязкую, чем вода, что, конечно, нереально.

Помимо этого при моделировании пространственного речного потока необходимо формирование процесса переноса наносов в деформируемых границах, поведение которых определяется кроме законов течения жидкости геоморфологией речного водосбора, гидрологическим режимом и законами механики грунтов. Однако ввиду того, что современная теория русловых процессов не располагает замкнутой системой уравнений, описывающих весь комплекс процессов, проявляющихся при взаимодействии жидкой и сыпучей сред, задача установления всех необходимых критериев и признаков точного подобия в настоящее время представляется трудновыполнимой. В этих условиях особо важным является исследование задачи приближенного моделирования. Решение такой задачи упрощается наличием зоны автомодельности по числу Рейнольдса, в пределах которой открытые потоки в натурных и лабораторных условиях являются турбулентными, а значит, в пределах этой зоны подобными. Это обстоятельство позволяет исключить при приближенном моделировании число Рейнольдса из числа критериев моделирования при соблюдении ряда условий, сохраняющих параметры турбулентных вихрей в модельных потоках.

Одним из возможных условий является ограничение степени геометрического искажения модели (степени различия горизонтального и вертикального масштабов). Полное подобие характеристик крупномасштабных турбулентных вихрей достигается при неискаженном моделировании, т. е. равенстве горизонтального и вертикального масштабов моделирования. Таким образом, единственным

критерием подобия при гидравлическом моделировании потоков с открытой поверхностью в области автомодельности остается *число Фруда*. Идентичность этого критерия для модели и натуры обеспечивает подобие гидравлических процессов без замены жидкости. Методика проведения экспериментальных исследований, разработанная для выполнения описываемой экспериментальной работы, базируется на методике физического моделирования на деформируемых моделях Государственного гидрологического института (ГГИ), апробированной в ходе многолетнего опыта моделирования в русловой Гидравлической лаборатории ГГИ [16]. Известно, что при моделировании участков рек, сложенных из песка, т. е. равнинных рек, уменьшение крупности частиц в геометрическом масштабе модели невозможно, так как это приводит к микроскопическим размерам песка, обладающим свойством сцепления между частицами, нехарактерным для песка крупностью более 0,2 мм.

В практике моделирования при определенных гидравлических характеристиках модельного потока допустим метод решения проблемы моделирования деформаций речного дна, суть которого заключается в использовании при моделировании кварцевого песка диаметром не менее 0,1 мм, если скорости модельного потока обеспечивают его достаточную подвижность и движение донных наносов (бесструктурный транспорт, движение наносов в форме гряд, движение наносов в виде средних русловых форм). При этом при движении наносов в бесструктурной форме необходим учет коэффициента искажения подвижности наносов и размеров песчаных фракций при пересчете результатов моделирования деформаций дна и расхода наносов на натурные условия. Именно такая методика моделирования механизма движения донных наносов и деформаций дна была использована в настоящей работе. Следует отметить, что при физическом гидравлическом моделировании речного потока с деформируемыми границами не ставилась задача полного дублирования модели речного потока и его деформаций.

Задачей гидравлической модели, созданной в рамках настоящей работы, являлось установление экспериментальным путем гидравлических характеристик потока и параметров деформаций речного дна в районе русловых опор под шпунтовой защитой с прикрытием ледорезного устройства при различных вариантах его конструкции и расположения в створе опоры. Воспроизведение гидравлической структуры и гидравлических характеристик потока, а также механизма движения донных наносов может быть обеспечено на модели при выборе такого значения параметра B/H , где B — ширина лотка, H — глубина потока на модели в лотке, при котором влияние боковых стенок лотка на гидравлику потока на его оси исключено. Это условие определяет возможность установления плановых и вертикальных масштабов модели в гидравлическом лотке с фиксированной шириной. Также корректное воспроизведение указанных параметров может быть обеспечено только на неискаженной модели, т. е. на модели с равными плановыми и вертикальными масштабами. Кроме того, уменьшение масштабов модели ограничено требованием обеспечения необходимой интенсивности движения на модели донных наносов со средними диаметрами натурального русла.

Лабораторная установка для исследования полей скоростей течения и местных размывов дна в районе русловых опор под шпунтовой защитой с прикрытием ледорезного устройства была смонтирована на базе руслового лотка Гидротехнической лаборатории им. профессора В. Е. Тимонова ЛИВТа (ныне ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова [17]. Характеристики руслового лотка: длина русловой части — 40,0 м; ширина — 2,0 м; высота стен — 0,8 м; возможные расходы воды — до 120 л/с. С учетом указанных ранее методических ограничений был выбран единый горизонтальный и вертикальный (высота, глубина) масштаб модели — 1: 50. При таком едином масштабе модели, безусловно, обеспечивается выполнение в процессе моделирования указанных ранее требований и ограничений, а также основных условий подобия соответствующих характеристик потока и донных размывов.

Исходя из одинаковости критериев подобия для натурального объекта и модели, определились масштабы для пересчета параметров модели на характеристики натурального объекта:

– *линейные масштабы*:

продольный горизонтальный: $a_L = 50$;

поперечный горизонтальный: $a_B = 50$;

вертикальный: $a_H = 50$;

– масштабы скорости потока:

горизонтальная составляющая: $a_{ог} = \sqrt{a_H} = 7,07$;

вертикальная составляющая: $a_{ов} = \sqrt{a_H} = 7,07$;

– масштаб расхода воды: $a_Q = a_H^{5/2} = 17\,677,7$;

– масштаб времени: $a_T = \sqrt{a_H} = 7,07$.

В лабораторной установке в масштабе были воспроизведены (рис. 2) следующие элементы:

– участок реки длиной 250 м (5 м в масштабе на модели);

– шпунтовый короб защиты русловых опор размером 392×252 мм с продольной осью, расположенной на центральной продольной оси лотка, передняя (напорная) грань короба расположена на расстоянии 225 см от начала исследуемого участка; расстояние выбиралось из условия установления равномерной структуры потока и распределения скоростей по ширине русла на подходе к шпунтовому коробу и ледорезному устройству при различном его расположении;

– ледорезное устройство в виде равнобедренного треугольника со стороной 308,5 мм, расположенное перед коробом шпунтовой защиты опор (расстояния между ледорезом и коробом изменялись в процессе проведения эксперимента).



Рис. 2. Модель шпунтового короба под защитой ледореза, который может быть размещен в русле реки (фото авторов)

Для моделирования дна был использован кварцевый песок со средним диаметром 0,26 мм, гранулометрический состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав донных наносов в экспериментальных исследованиях

Фракция, мм	Содержание, %
0,4–0,315	8,50
0,315–0,200	20,00
0,200–0,160	49,40
0,160–0,100	14,00
0,100–0,063	7,00
0,063–0,05	0,75
Менее 0,05	0,35
Всего	100 %

Основной задачей лабораторных гидравлических исследований являлось определение размеров и локализации размывов и намывов на дне потока в районе конструкций, возводимых при строительстве мостовых опор: шпунтового короба и ледорезного устройства.

Наибольшая глубина местного размыва h в однородном несвязном грунте у опоры (в виде одиночно стоящей сваи, сваи-оболочки и т. п.), имеющей от уровня воды до дна воронки местного размыва постоянную ширину поперечного сечения, в соответствии с действующими нормами при поступлении наносов в воронку размыва, определяемая по формуле

$$h = 0,77 H^{0,4} b^{0,6} \left(\frac{v}{v_b} \right)^{\frac{1}{2}} MK,$$

где b — расчетная ширина (поперечное сечение) опоры, равная ширине ее передней грани, м;
 v , H — средняя скорость (м/с) и глубина потока (м) перед опорой после общего размыва;
 v_b — взмучивающая скорость потока для грунта, в котором происходит местный размыв, м/с;
 M , K — коэффициенты формы и косины опоры.

Взмучивающую скорость v_b , характеризующую мутность потока, т. е. содержание взвешенных наносов в единице объема воды) определяют по формуле

$$v_b = (g w H)^{\frac{1}{3}};$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²;

w — гидравлическая крупность размываемого грунта, м/с.

Коэффициент формы опоры M необходимо принимать следующий:

- для опоры прямоугольной в плане формы — 1,24;
- для опоры с верховой стороны в виде двугранного угла 60° — 0,73.

Коэффициент косины K возникает в случае, когда продольная ось опоры образует с направлением набегающего на нее потока угол α (если $\alpha = 0$, то принимается $K = 1$).

С учетом величин, остающихся постоянными в рассматриваемом случае обтекания опоры (b , w , M , K), глубина размыва у опоры определяется параметром $[(H)^{0,23} \times (v)^{0,5}]$. Предварительные расчеты [3] показали, что в створе мостового перехода величина этого параметра изменяется у различных опор моста в пределах 1,61–2,07. Этот диапазон значений охватывает гидравлику потока при расчетном уровне воды для всех русловых опор проектируемого моста, поэтому в качестве предельных (граничных) значений характеристик для модельных гидравлических исследований характеристик потока и переформирований дна были приняты максимальное и минимальное значения этого параметра. Гидравлические характеристики потока в районе опор в натурных условиях, а также пересчитанные для модели, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Гидравлические характеристики потока в районе мостовых опор

Номер цикла опытов	Для натуры		Для модели		
	Глубина, м	Удельный расход, м ³ /(м · с)	Глубина, мм	Удельный расход, л/(м · с)	Расход в лотке, л/с
1	6,32	11,14	126	31,5	55,0
2	10,40	21,47	208	60,74	106,3

Суммарный расход в лабораторном русловом лотке определялся из удельного расхода с учетом ширины лотка и стеснения потока расположенными в нем конструкциями.

Неразмывающая скорость для условий движения потока в экспериментальном лотке, рассчитанная по формуле (1), составила 0,272 м/с, по формуле (2) — 0,280 м/с. Средние скорости движения потока при обтекании шпунтового короба, рассчитанные с учетом стеснения потока, составили 0,280–0,352 м/с. Как показали измерения скоростей при проведении экспериментов, скорости

потока, обтекающего конструкции, достигали значений 0,36–0,38 м/с. Таким образом, движение наносов на модели обеспечивалось во всем диапазоне исследованных условий.

В процессе проведения экспериментов необходимо было достичь установившегося режима, при котором форма и размеры размывов и намывов остаются практически постоянными. Характерное время достижения такого режима определяется, как отмечалось ранее, условием (3). Рассчитанное по этой формуле время для различных режимов модельных исследований в экспериментальном гидравлическом лотке, изменялось в диапазоне 23–29 мин.

Результаты (Results)

Эксперименты на гидравлической модели выполнялись в следующем порядке. На первом этапе в лотке устанавливалась модель шпунтового короба (без ледорезного устройства). В лоток подавался поток воды, устанавливались параметры эксперимента (расход и глубина), соответствующие данным, приведенным в табл. 2 (рис. 3).



Рис. 3. Испытание с коробом без ледореза (фото авторов)



Рис. 4. Структура рельефа дна после прокачки (фото авторов)

Пропускание потока воды в лотке осуществлялось в течение времени, необходимого для достижения установившегося режима (с запасом) — не менее 90–120 мин. На втором этапе подача воды в лоток прекращалась, вода из лотка сливалась, обнажая дно в окрестностях короба со сформировавшейся структурой размывов (рис. 4), шпигенмасштабом проводились замеры величины углублений и выступов рельефа дна. На третьем этапе поверхность дна вокруг конструкций выравнивалась и вблизи короба устанавливалась модель ледорезного устройства: первая позиция — вплотную к коробу (рис. 5).



Рис. 5. Короб с ледорезом, подготовленный к пропуску воды (фото авторов)

В лоток подавалась вода с установленными параметрами, соответствующими предыдущему проливу короба. Пролив продолжался до достижения установившегося режима. Затем производился слив воды из лотка и измерения параметров рельефа.

Эксперименты проводились для различных вариантов положения ледореза относительно шпунтового короба, ледорез перемещался вверх по потоку вдоль оси потока (лотка) с шагом 0,1 м (5 м для натурных условий). Таким образом, циклы экспериментов проводились для следующих положений

ледореза относительно шпунтового короба: 0 см; 100 мм; 200 мм; 300 мм; 400 мм; 500 мм, что соответствовало расстояниям в натурных условиях: 0 м; 5 м; 10 м; 15 м; 20 м; 25 м. Затем модель возвращалась к исходным условиям: короб без ледорезного устройства, дно выровнено и цикл экспериментов проводился для других параметров (расхода и глубины).

Для некоторых циклов экспериментов, указанных далее, были выполнены также следующие процедуры:

- измерение направлений, траекторий и скоростей поверхностных течений методом фотофиксации камерой Canon 7D движения специально изготовленных разноцветных светоотражающих поверхностных поплавков;

- измерение скоростей течений в различных точках поперечного сечения потока, распределенных по его ширине и глубине (измерения проводились лабораторной микровертушкой).

При проведении экспериментальных гидравлических испытаний в русловом лотке были выполнены два цикла измерений:

- цикл I: глубина воды в районе модели шпунтового короба 126 мм; расход воды в лотке 55,0 л/с;

- цикл II: глубина воды в районе модели шпунтового короба 208 мм; расход воды в лотке 106,3 л/с.

Практически с начала пропуска потока воды, обтекающего размещенные в русловом лотке модели конструкций, начиналось формирование размывов вблизи фронтальной (напорной) области конструкции (короба либо ледорезного устройства). В боковых и тыловой частях конструкций начиналось формирование донных гряд, расположение и размеры которых существенным образом зависели от отсутствия или наличия ледореза, а также взаимного положения ледореза и короба.

Окончательное установление донного рельефа действительно происходило в течение времени, соответствующего условию (3). Сопоставление профилей донного рельефа, измеренных через 90 мин, 2 ч и 6 ч прохождения потока, не выявило каких-либо изменений в этом рельефе. Фотографии донного рельефа для цикла I измерений приведены на рис. 6.

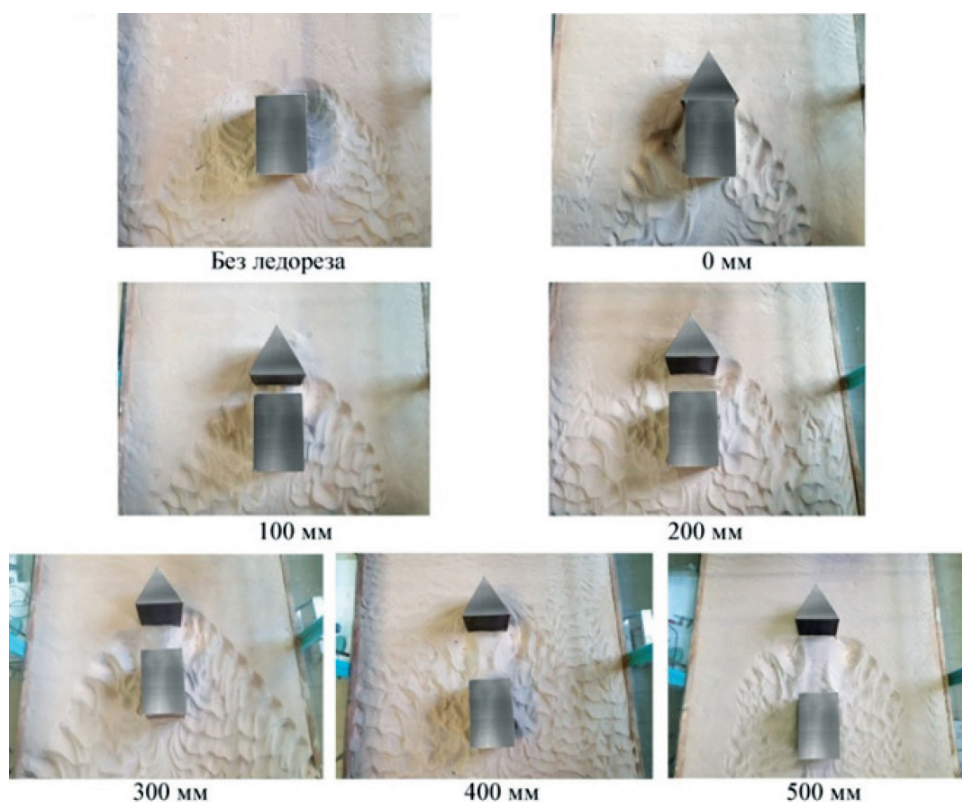


Рис. 6. Фотографии донного рельефа для цикла I (расход 55,0 л/с)
(фото авторов)

По данным измерений отметок поверхности дна были построены двумерные планы размывов, схемы которых для цикла I приведены на рис. 7, а. На схемах приведена цветовая высотная шкала для отображения отметок дна, позволяющая оценить рельеф, сформированный в результате обтекания потоком размещенных в русле конструкций. Результаты измерения отметок дна при расходе 106,3 л/с (для цикла II) приведены на рис. 7, б.

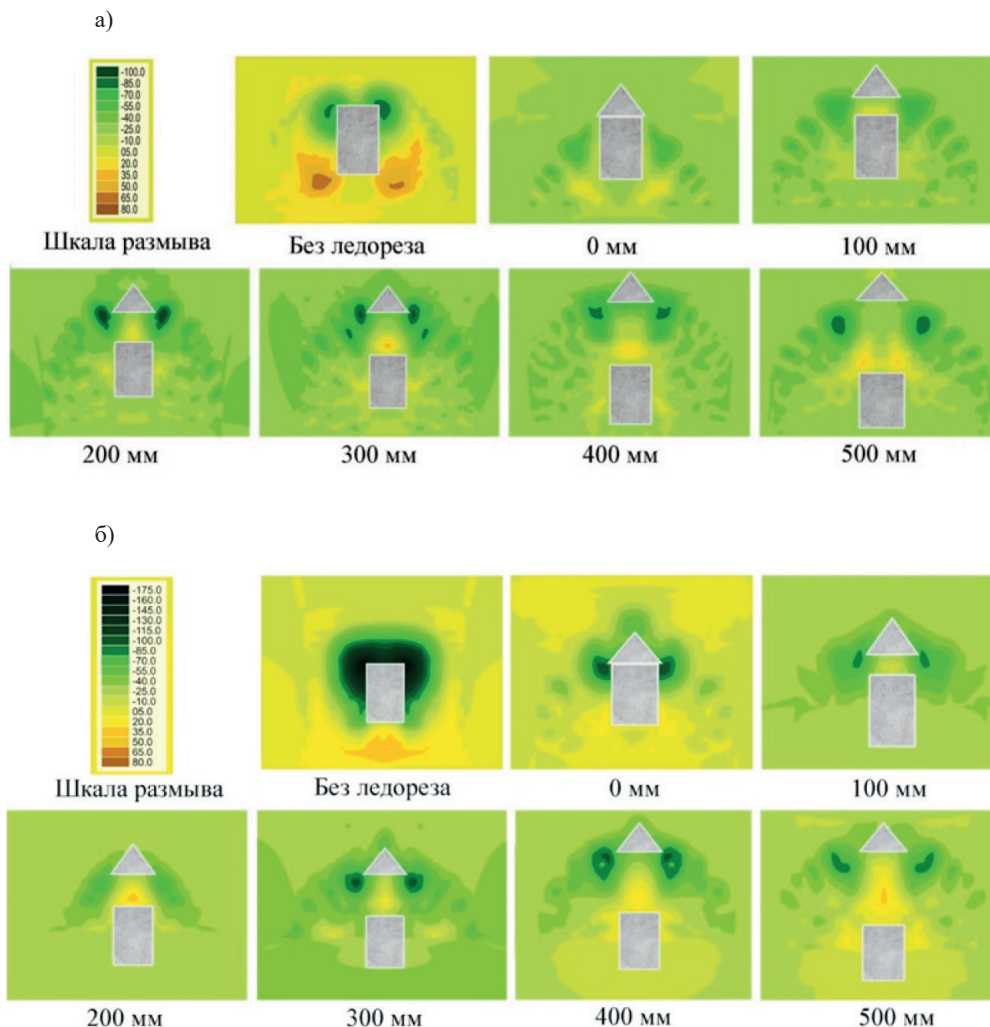


Рис. 7. Двумерные схемы размывов:
а — при расходе 55,0 л/с; б — при расходе 106,3 л/с

Для нескольких вариантов расположения конструкций *методом фотофиксации* движения поверхностных поплавков были определены траектории и направления движения потока, что позволило составить сетку линий тока и рассчитать значения поверхностных скоростей течения для следующих вариантов — рис. 8:

- расход 55,0 л/с, глубина 126 мм, расстояние от ледореза до короба 40 см;
- расход 106,3 л/с, глубина 208 мм, расстояние от ледореза до короба 0 см;
- расход 106,3 л/с, глубина 208 мм, расстояние от ледореза до короба 20 см.

При этом чтобы зафиксировать различие в распределении скоростей на поверхности потока между неустановившимся (в начале процесса) и установившимся режимами, измерения проводились в начале процесса и через два часа после его начала. Были также выполнены измерения поля скоростей микровертушкой для нескольких режимов. Схема распределения средних на вертикалях скоростей, измеренных микровертушкой, приведена на рис. 9.

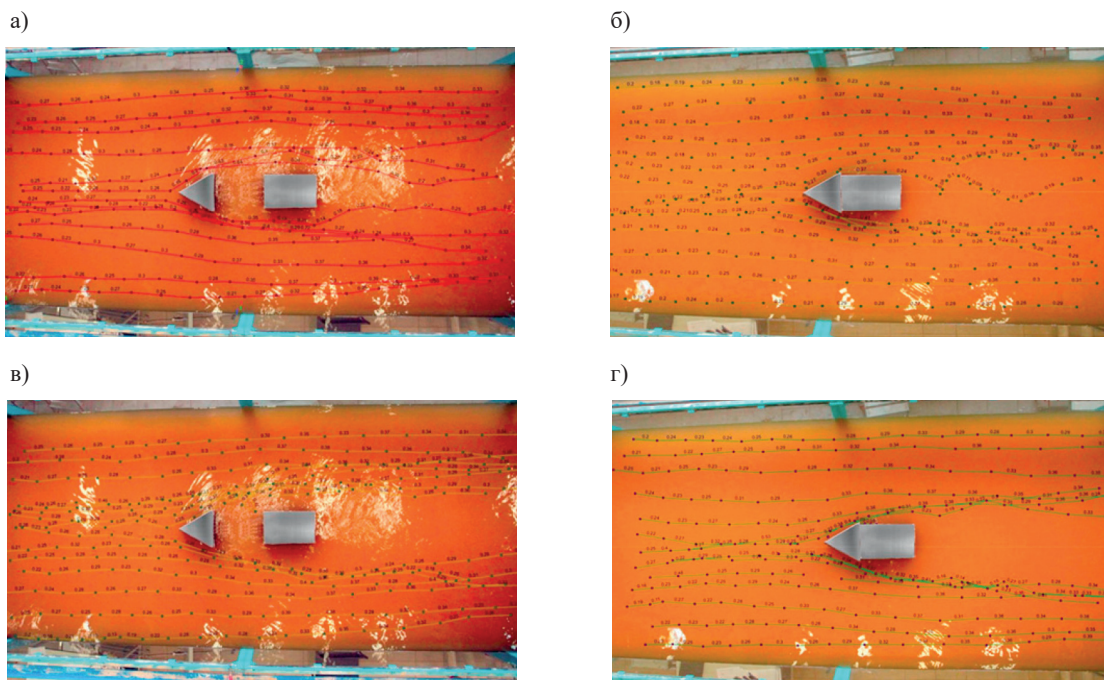


Рис. 8. Траектории поверхностных поплавков: а, в — начало процесса; б, г — установившийся режим (слева — расход 55,0 л/с, глубина 126 мм; справа — расход 106,3 л/с, глубина 208 мм)

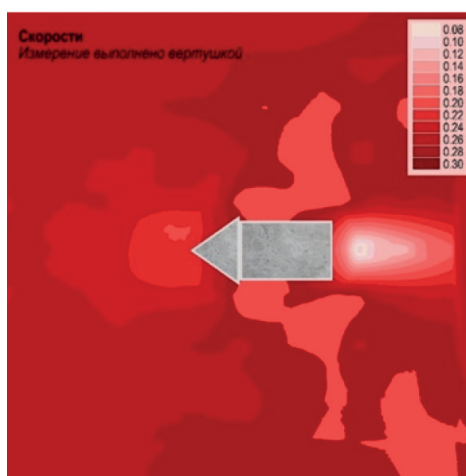


Рис. 9. Распределение скоростей:
расход 106,3 л/с, глубина 208 мм

Распределение абсолютных значений скорости течения в потоке:

- на подходе к конструкции скорости практически одинаковы по всей ширине лотка и близки к средней скорости:
 - для первого цикла (расход 55,0 л/с) — 0,22–0,23 м/с (в пересчете на натурные условия 1,5–1,7 м/с);
 - для второго цикла (расход 106,3 л/с) — 0,27–0,29 м/с (для натуральных условий — 1,9–2,1 м/с);
- при обтекании конструкций в боковых пролетах скорости увеличиваются из-за стеснения потока, достигая следующих значений:
 - для первого цикла (расход 55,0 л/с) — 0,32–0,34 м/с (для натуральных условий — 2,3–2,4 м/с);
 - для второго цикла (расход 106,3 л/с) — 0,37–0,38 м/с (для натуральных условий — 2,6–2,7 м/с);
- к средним значениям, равномерно распределенным по ширине лотка, поле скоростей возвращается на расстоянии 1,5–1,8 м ниже тыловой грани короба (для натуральных условий — 75–90 м).

Обсуждение (Discussion)

Анализ распределения скоростей по поверхности и в объеме потока показал, что в начальный период процесса за конструкцией короба возникают зоны завихрения с малыми продольными скоростями: 0,10–0,15 м/с (для натуральных условий 0,7–1,06 м/с). Возможно, в этой зоне возникают и участки с обратным течением, но использованными в эксперименте методами (фотофиксация движения поплавков и измерения микровертушкой) их обнаружить нельзя. С установлением процесса вокруг конструкции формируется подковообразный вихрь, вдоль крыльев которого возникают рифели и гряды (рис. 10). Внутри «подковы» устанавливается зона застоя.



Рис. 10. Структура дна вдоль следа подковообразного вихря

В этой зоне дно остается относительно гладким, на нем отсутствуют сформировавшиеся донные структуры. Такая картина достаточно хорошо согласуется с данными, из источников [1], [2], [8], [9]. При отсутствии ледореза основные зоны размыва грунта возникают в окрестности углов фронтальной грани короба (рис. 11).

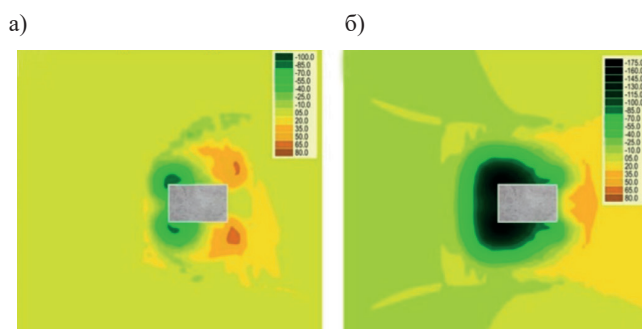


Рис. 11. Схема размыва при отсутствии ледореза:
а — цикл I; б — цикл II

В тыловой части конструкции формируются намывы — возвышения поверхности относительно первоначальных отметок. При установке перед коробом ледорезного устройства в форме треугольника, направленного острым углом навстречу набегающему потоку, условия обтекания меняются (рис. 12).

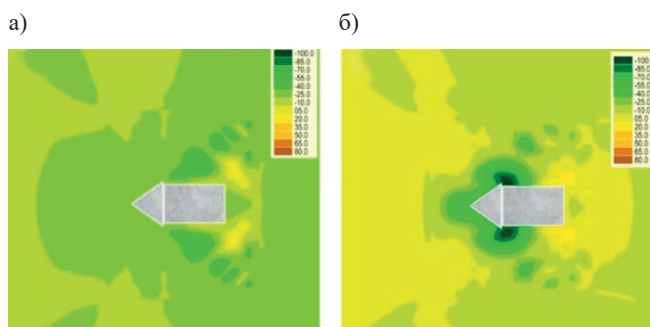


Рис. 12. Схема размыва с ледорезом вплотную к коробу:
а — цикл I; б — цикл II

Зоны размывов перемещаются в окрестности углов, лежащих в основании треугольного ледореза, обращенном к коробу. Намывы в следе за коробом остаются. При этом абсолютные значения глубины размыва и высоты намыва при установке ледореза вплотную к коробу уменьшаются (по сравнению с вариантом без ледореза). При дальнейшем перемещении ледореза относительно короба вверх по потоку зоны размывов в окрестностях нижних углов ледореза остаются, и возникает зона намыва в промежутке между ледорезом и коробом (рис. 13).

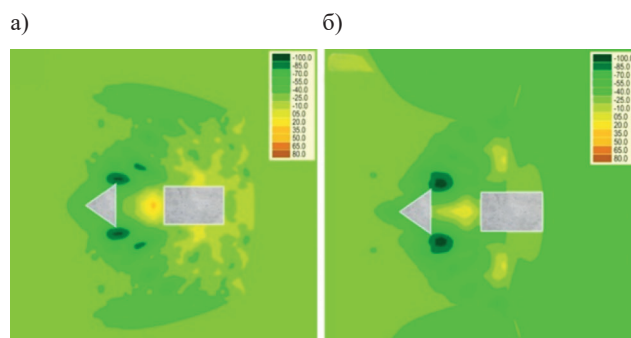


Рис. 13. Схема размыва с ледорезом в 300 мм от короба:
а — цикл I; б — цикл II

Обобщенные результаты абсолютных значений размывов и намывов приведены в табл. 3, откуда видно, что в цикле I выполненных экспериментов максимальные значения размыва и намыва возникают в следующих случаях: при отсутствии ледореза, при размещении ледореза на расстоянии 200 мм от короба, при размещении ледореза на расстоянии 300 мм от короба. Минимальные значения размыва и намыва зафиксированы при размещении ледореза вплотную к коробу опоры.

Таблица 3

Результаты эксперимента

Положение ледореза относительно опоры, мм	Цикл I (расход 55,0 л/с)				Цикл II (расход 106,3 л/с)			
	Максимальный размыв		Намыв		Максимальный размыв		Намыв	
	Модель, мм	Натура, м	Модель, мм	Натура, м	Модель, мм	Натура, м	Модель, мм	Натура, м
Без ледореза	–90	–4,50	58,1	2,91	–182	–9,10	32,5	1,63
0	–57	–2,85	24	1,20	–117,5	–5,88	18,5	0,93
100	–67	–3,35	21	1,05	–81,0	–4,05	9,6	0,48
200	–94,5	–4,73	24	1,20	–73,5	–3,68	48,6	2,43
300	–90	–4,50	42	2,10	–92,5	–4,63	21,6	1,08
400	–79,5	–3,98	31	1,55	–97,5	–4,88	30,6	1,53
500	–86	–4,30	38	1,90	–91,5	–4,58	42,6	2,13

В цикле II экспериментов при больших расходах и глубинах значения размывов и намывов оказались больше, чем в первом цикле. При этом максимальные значения размывов также возникали при отсутствии ледореза. Минимальные значения размыва зафиксированы при размещении ледореза на расстоянии 200 мм от короба.

Выводы (Summary)

Анализ результатов эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

1. При установке ледорезного устройства улучшаются гидравлические условия обтекания конструкции шпунтового короба. Это приводит к уменьшению глубин размывов. Порядок

уменьшения глубины размывов, в принципе, коррелирует со значениями, определяемыми указанными ранее нормами[†], согласно которым коэффициенты формы для опоры прямоугольной в плане формы ($M = 1,24$) и опоры с верховой стороны в виде двугранного угла 60° ($M = 0,73$) отличаются на 41 %.

2. В проведенных опытах эти отличия составили: для цикла I — 36,7 %; для цикла II — 35,5 %. Это можно объяснить тем обстоятельством, что исследованная конструкция ледореза по ширине несколько превышает поперечные размеры шпунтового короба. С острых углов при основании треугольного в плане сечения ледореза срываются вихри, которые оказывают влияние на структуру потока, обтекающего конструкцию. При перемещении ледореза вверх по потоку возникают условия попадания потока между ледорезом и шпунтовым коробом, что, по-видимому, уменьшает интенсивность вихреобразования и глубину размыва. Однако при увеличении расстояния между ледорезом и коробом их взаимное влияние на поток в этом промежутке уменьшается, и глубины размывов в окрестности плохо обтекаемых участков ледореза увеличиваются, что проявилось в обоих циклах исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саруханян А. А. Исследование русловых деформационных процессов на участках мостовых переходов георесурсных транспортных систем / А. А. Саруханян, П. О. Балджян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 5. — С. 148–155. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3194.
2. Алибеков А. К. Оценка размыва у свайных опор сооружений, пересекающих водотоки, с учетом показателей надежности и неоднородности грунтов основания / А. К. Алибеков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2018. — Т. 45. — № 1. — С. 181–192.
3. Беляков П. В. Анализ и оценка гидроморфологической ситуации на участке строительства мостового перехода через р. Зею в г. Благовещенске с помощью математического моделирования характеристик движения воды / П. В. Беляков, С. В. Конопацкий, П. С. Ржаковская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 862–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-862-874.
4. Topczewski L. Monitoring of scour around bridge piers and abutments / Ł. Topczewski, J. Cieřła, P. Mikołajewski, P. Adamski, Z. Markowski // Transportation Research Procedia. — 2016. — Vol. 14. — Pp. 3963–3971. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.493.
5. Arneson L. A. Evaluating scour at bridges / L. A. Arneson, L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, P. E. Clopper. — Fifth Edition. — U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012. — 340 p.
6. Калякин А. М. Модель процесса размыва перед препятствием типа мостовой опоры на основе представлений о вихре / А. М. Калякин // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1997. — С. 33–43.
7. Unger J. Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers / J. Unger, W. H. Hager // Experiments in Fluids. — 2007. — Vol. 42. — Pp. 1–19. DOI: 10.1007/s00348-006-0209-7.
8. Воскобойник А. А. Локальный размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом / А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник [и др.] // Прикладна гідромеханіка. — 2006. — Т. 8. — № 3. — С. 16–26.
9. Калякин А. М. Обобщенная модель обтекания препятствия открытым турбулентным потоком / А. М. Калякин, Е. В. Чеснокова // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 3 (55). — С. 49–56. DOI: 10.5862/MCE.55.6.
10. Salaheldin T. M. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers / T. M. Salaheldin, J. Imran, M. H. Chaudhry // Journal of Hydraulic Engineering. — 2004. — Vol. 130. — Is. 2. — Pp. 91–100. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91).
11. Никишов В. И. От гидравлики открытых потоков — к гидромеханике речных систем / В. И. Никишов // Прикладна гідромеханіка. — 2007. — Т. 9. — № 2–3. — С. 103–121.
12. Laursen E. M. An analysis of relief bridge scour / E. M. Laursen // Journal of the Hydraulics Division. — 1963. — Vol. 89. — Is. 3. — Pp. 93–118. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000896.
13. Халфин И. Ш. Моделирование и расчет размыва дна вокруг вертикального цилиндра большого диаметра под воздействием волн / И. Ш. Халфин // Водные ресурсы. — 2007. — Т. 34. — № 1. — С. 56–67.

14. Воскобойник А. А. Визуализация сопряженного обтекания групповой мостовой опоры / А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник // Вісник Донецького університету/Сер. А: Природничі науки. — 2008. — Вип. 1. — С. 219–227.

15. Михалев М. А. Физическое моделирование местного размыва у цилиндрических мостовых опор в несвязных грунтах / М. А. Михалев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. — 2012. — Т. 267. — С. 3–18.

16. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 504 с.

17. Morgunov K. Experimental studies of the kinematics flow and bottom's reformations in the area of bridge pier during the construction of the bridge crossing / K. Morgunov, G. Gladkov, Y. Ivanovsky // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2131. — Is. 3. — Pp. 032064. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032064.

REFERENCES

1. Sarukhanyan, A. A., and P. O. Baldjyan. "Study of channel deformation at bridge crossing sections of geo-resources transportation systems." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 332.5 (2021): 148–155. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3194.

2. Alibekov, A. K. "Evaluation of scouring at pile-supported structures crossing watercourses according to reliability and inhomogeneity indicators of grounding foundations." *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences* 45.1 (2018): 181–192.

3. Belyakov, Pachom V., Sergei V. Konopatsky, and Polina S. Rzhakovskaya. "Analysis and assessment of the hydromorphological situation at the construction site of a bridge crossing over the Zeya river in Blagoveshchensk using mathematical modeling of water movement characteristics." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 862–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-862-874.

4. Topczewski, Łukasz, Juliusz Cieśla, Paweł Mikołajewski, Paweł Adamski, and Zenon Markowski. "Monitoring of scour around bridge piers and abutments." *Transportation Research Procedia* 14 (2016): 3963–3971. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.493.

5. Arneson, L. A., L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, and P. E. Clopper. *Evaluating scour at bridges*. Fifth Edition. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012.

6. Kalyakin, A. M. "Model' protsessa razmyva pered prepyatstviem tipa mostovoi opory na osnove predstavlenii o vikhre." *Sovershenstvovanie metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzhenii: mezhvuz. nauch. sb.* Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 1997. 33–43.

7. Unger, Jens, and Willi H. Hager. "Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers." *Experiments in Fluids* 42 (2007): 1–19. DOI: 10.1007/s00348-006-0209-7.

8. Voskoboinik, A. A., A. V. Voskoboinik, V. A. Voskoboinik, A. G. Marchenko, and V. I. Nikishov. "Lokal'nyi razmyv grunta pri vzaimodeistvii mostovykh opor, nakhodyashchikhsya v slede drug za drugim." *Prikladna gidromekhanika* 8.3 (2006): 16–26.

9. Kalyakin, A. M., and E. V. Chesnokova. "Generalized model of free turbulent flows around obstacles." *Foundation engineering. Hydraulic construction* 3(55) (2015): 49–56. DOI: 10.5862/MCE.55.6.

10. Salaheldin, Tarek M., Jasim Imran, and M. Hanif Chaudhry. "Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers." *Journal of Hydraulic Engineering* 130.2 (2004): 91–100. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91).

11. Nikishov, V. I. "Ot gidravliki otkrytykh potokov — k gidromekhanike rechnykh system." *Prikladna gidromekhanika* 9.2–3 (2007): 103–121.

12. Laursen, Emmett M. "An analysis of relief bridge scour." *Journal of the Hydraulics Division* 89.3 (1963): 93–118. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000896.

13. Khalfin, I. Sh. "Modelirovanie i raschet razmyva dna vokrug vertikal'nogo tsilindra bol'shogo diametra pod vozdviem voln." *Vodnye resursy* 34.1 (2007): 56–67.

14. Voskoboinik, A. A., A. V. Voskoboinik, and V. A. Voskoboinik. "Vizualizatsiya sopryazhennogo obtekaniya gruppovoi mostovoi opory." *Visnik Donets'kogo universitetu, Ser. A: Prirodnichi nauki* 1 (2008): 219–227.

15. Mikhalev, M. A. "Physical modeling of local scour nearby cylindrical bridge supports in noncohesive soils." *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* 267 (2012): 3–18.

16. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlicheskie modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.

17. Morgunov, K., G. Gladkov, and Yu Ivanovsky. "Experimental studies of the kinematics flow and bottom's reformations in the area of bridge pier during the construction of the bridge crossing." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2131. No. 3. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032064.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргунов Константин Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Ивановский Юрий Кириллович — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ivanovskyyk@gumrf.ru

Богатырёв Владислав Григорьевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: bogatyrevvg@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Morgunov, Konstantin P. —

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

Ivanovsky, Yuri K. — Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: ivanovskyyk@gumrf.ru

Bogatyrev, Vladislav G. —
PhD

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

*Статья поступила в редакцию 21 октября 2023 г.
Received: October 21, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-987-997

REQUIREMENTS FOR THE VESSELS OPERATION AT HEAVY-LIFT CARGOES CARRIAGE

I. S. Onishchenko^{1,2}, I. Z. Chereysky¹, I. A. Gulyaev³

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

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

³ — Russian Classification Society, Moscow, Russian Federation

The approaches used by different classification societies to standardize calculated acceleration under ship motion during heavy lift cargoes transportation are analyzed in the paper. The methods of estimating the efficiency of securing devices of “non-standardized cargoes” carried on ships are investigated. The analysis of the parameters taken into account in determining the design accelerations at ship motion is carried out. Five representative vessels, which had previously carried heavy lift cargoes under different conditions, are selected. Computer modelling of these vessels motion at different course angles is performed in “SafeSea” programme, and calculated (conditional) amplitudes of motion regulated by the Rules of the Russian Classification Society are determined by “Stabedit” programme. The forced and own periods of onboard rolling are calculated in the specialised software complex “Anchored Structures” at variation of wave modes, loading states and values of metacentric height. The calculation results for representative vessels have shown a satisfactory matching of own and forced rolling periods. It is noted that in the range of $1.5 \text{ m} \leq h_{3\%} \leq 4.5 \text{ m}$ for the considered intervals of metacentric height, in most cases the forced rolling periods are slightly longer than the own ones. Based on the results of the research, the recommendations for determination of rolling amplitudes of inland and mixed navigation vessels of “P”, “O”, “M”, “O-PR”, “M-PR”, “M-SP” classes carrying heavy lift cargoes are given. The proposals on standardised design acceleration at motion of a ship carrying heavy lift cargo are also given for the mentioned classes of ships. The results of the research are included in the draft Guidelines for the assignment of design acceleration at rocking of mixed (river-sea) and inland navigation vessels and safety margins of heavy lift cargoes securing systems, developed for the Russian Classification Society.

Keywords: ship rolling, navigation safety, inland vessels, mixed navigation vessels, heavy lift cargoes, accelerations when rolling, inland waterways.

For citation:

Onishchenko, Irina S., Igor Z. Chereysky, and Ilya A. Gulyaev. “Requirements for the vessels operation at heavy-lift cargoes carriage.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 987–997. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-987-997.

УДК 656.62; 629.017

ТРЕБОВАНИЯ К ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ГРУЗОВ

И. С. Онищенко^{1,2}, И. З. Черейский¹, И. А. Гуляев³

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

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

³ — ФАУ «Российское Классификационное Общество», Москва, Российская Федерация

В статье выполнен анализ используемых различными классификационными обществами подходов к нормированию расчетных ускорений при качке судов в процессе перевозки крупногабаритных тяжеловесных грузов. Исследованы методы оценки эффективности креплений «нестандартизированных грузов», перевозимых на судах. Выполнен анализ параметров, учитываемых при определении расчетных ускорений при качке судна. Выбраны пять судов-представителей, на которых ранее выполнялась перевозка крупногабаритных тяжеловесных грузов в различных условиях. Выполнено компьютерное моделирование качки указанных судов при различных курсовых углах в программе SafeSea, а расчетные (условные) амплитуды качки, регламентируемые Правилами Российского Классификационного Общества, определялись по программе

StabEdit. Выполнен расчет вынужденных и собственных периодов бортовой качки в специализированном программном комплексе Anchored Structures при вариации режимов волнения, состояний загрузки и значений метацентрической высоты. Результаты расчета для судов-представителей показали удовлетворительное согласование собственных и вынужденных периодов качки. Отмечается, что в диапазоне режимов волнения $1,5 \text{ м} \leq h_{3\%} \leq 4,5 \text{ м}$ для рассмотренных интервалов метацентрической высоты в большинстве случаев вынужденные периоды качки несколько больше собственных. По результатам исследования даны рекомендации по определению амплитуд качки судов внутреннего и смешанного плавания классов «Р», «О», «М», «О-ПР», «М-ПР», «М-СП», перевозящих крупногабаритные тяжеловесные грузы. Также для указанных классов судов даны рекомендации по нормируемым расчетным ускорениям при качке судна, перевозящего крупногабаритный тяжеловесный груз. Результаты исследования отражены в проекте «Руководства по назначению расчетных ускорений при качке судов смешанного (река – море) и внутреннего плавания и запасов прочности конструкций крепления крупногабаритных тяжеловесных грузов», разработанного для Российского Классификационного Общества.

Ключевые слова: качка судов, безопасность судоходства, суда внутреннего плавания, суда смешанного плавания, крупногабаритные тяжеловесные грузы, ускорения при качке, внутренние водные пути.

Для цитирования:

Онищенко И. С. Требования к эксплуатации судов при перевозке крупногабаритных тяжеловесных грузов / И. С. Онищенко, И. З. Черейский, И. А. Гуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 987–997. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-987-997.

Введение (Introduction)

Активное развитие Арктики, наблюдаемое в последнее десятилетие в России, повлекло за собой повсеместное наращивание отечественного потенциала технологических мощностей, при этом водный транспорт не является исключением. Строительство крупных заводов в северной части страны в большинстве случаев достигается с использованием судов различного назначения, что объясняется удаленностью месторасположения строящихся объектов от сети наземного транспорта. Особое положение в данной системе доставки грузов занимают суда внутреннего и смешанного плавания с ограниченной осадкой и нехарактерным для традиционных морских судов соотношением главных размерений, эксплуатация которых возможна на внутренних водных путях (ВВП). Как отмечается в статье [1], на основных магистральных реках Сибири гарантированные глубины в последние годы не превышали 3,2 м, в ряде случаев составляя 1,7–2,2 м.

В настоящее время возросла потребность в перевозке крупногабаритных тяжеловесных грузов (КТГ) на судах с классом Российского Классификационного Общества (РКО) по ВВП и в прибрежных морских районах [2]–[8]. При этом в правилах и нормативных документах РКО в настоящее время, в отличие от других классификационных обществ, отсутствуют какие-либо требования к назначению расчетных нагрузок на элементы крепления КТГ и корпусные конструкции. Например, в случаях перевозки КТГ на судах с классом РКО в морских районах разрядов «М-ПР» и «О-ПР», а также на ВВП разряда «М», зачастую используются требования Правил Российского морского регистра судоходства (РС), принимая во внимание, что суда с классом РС предназначены для эксплуатации в морских районах, как правило, при существенно большем ограничении по допустимой высоте волны и большем допустимом удалении от места убежища. Такой подход в этом случае связан с необоснованным завышением требований к конструкциям креплений КТГ.

На практике отсутствие адаптированных к ВВП и прибрежным морским районам требований приводит к тому, что при разработке выполняемых различными организациями проектов крепления КТГ на судах класса РКО используются различные подходы, что не обеспечивает единый уровень безопасности при решении подобных задач. В связи с этим представляет интерес исследование применяемых в различных КО подходов к назначению расчетных нагрузок, зависящих в первую очередь от ускорений при качке.

Целью данной работы является создание методики определения расчетных ускорений при качке судов внутреннего и смешанного плавания РКО при перевозке КТГ на ВВП и в прибрежных морских районах. Основной задачей при этом является оптимизация требований к креплениям КТГ путем

создания подхода, обеспечивающего равные уровни безопасности эксплуатации судов с классом РКО по сравнению с другими классификационными обществами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В Правилах РС в явном виде нормируются ускорения при качке судна. Расчет этих параметров является обязательным ввиду того, что оценка прочности судна выполняется с учетом ускорений при качке судна (в частности, при определении нагрузки на грузовые настилы при проверке местной прочности). В соответствии с существующей практикой эти же расчетные ускорения, как правило, используются для определения нагрузок при перевозке КТГ, в том числе для определения конструктивных элементов крепления КТГ. При этом для определения расчетных ускорений по основным направлениям качки используют коэффициенты судна φ_r или φ , учитывающие влияние эксплуатационных ограничений по району и условиям плавания судов исходя из допустимой высоты волны и удаления от места убежища на расчетные волновые нагрузки от местного и общего изгиба соответственно. Применение такого подхода для перевозок на ВВП представляется весьма условным, так как очевидно, что передаточные функции для волновых нагрузок и ускорений при качке существенно различаются.

В нормативной базе РС, регламентирующей требования к судам, перевозящим КТГ, кроме Правил существуют и другие документы, к которым в первую очередь относится Руководство РС¹. Данный нормативный документ, сформированный на основе ранее разработанных АО «ЦНИИМФ» документов², кроме общих и организационных требований содержит также технические требования к перевозке различных видов грузов (контейнеров, структурообразующих и нестандартизированных грузов). Применительно к перевозке КТГ на судах внутреннего и смешанного плавания с классом РКО может быть использован термин «нестандартизированный груз» из указанного ранее Руководства РС, под которым понимается груз, для укладки и крепления которого постоянно требуется индивидуальный подход. Для таких грузов предусматривается два метода оценки эффективности средств крепления: упрощенный и усовершенствованный.

Упрощенный метод предусматривает использование поперечного ускорения, равного $g(9,81 \text{ м/с}^2)$, и применяется для расчета сил, действующих на суда любых размерений независимо от места размещения груза, остойчивости и условий погрузки, сезона и района плавания. Однако этот метод не учитывает ни отрицательного воздействия угла наклона найтовых и неравномерного распределения сил между средствами крепления, ни благоприятного влияния сил трения. Особенности условий эксплуатации судов ограниченного района плавания также не учитываются.

При использовании *усовершенствованного метода* внешние силы, действующие на груз в продольном, поперечном и вертикальном направлениях, определяются с учетом инерционных нагрузок от перевозимого груза, а также продольных и поперечных сил, возникающих под действием ветрового давления и удара волн. Расчетные ускорения определяются в зависимости от положения груза по длине и высоте судна, длины и скорости судна, отношения ширины судна к метacentрической высоте. Регламентируемые при использовании усовершенствованного метода расчетные ускорения при качке ориентированы на суда неограниченного района плавания. При этом в рассматриваемом «Руководстве по разработке Наставлений по креплению грузов»¹ оговаривается, что при эксплуатации судна в ограниченном районе плавания допускается снижение величин ускорений с учетом времени года и продолжительности рейса. Однако алгоритм такого снижения в данном документе не прописан.

Наряду с Правилами РС требования к морской перевозке грузов регламентируются также «Правилами морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов»² (далее — Правила) Министерства транспорта РФ, содержащими как организационные, так и технические требования при перевозке грузов, в частности КТГ. Для назначения нагрузок от КТГ, перевозимых на судах

¹ Руководство по разработке Наставлений по креплению грузов. НД № 2-030101-008. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2022. 39 с.

² Правила морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ). РД 31.11.21.24–96. СПб.: ЦНИИМФ, 1996. 45 с.

и понтонах, данными Правилами регламентируются безразмерные проекции суммарной силы от веса и инерции по различным направлениям, зависящие от длины судна, наличия скуловых килей и некоторой расчетной высоты волны $h_{3\%}$. Для судов неограниченного района плавания принято значение $h_{3\%} = 11$ м. Если перевозка выполняется в ограниченном районе плавания, то предусматривается корректировка расчетной высоты волны. В этом случае расчетные значения высот волн 3 %-й обеспеченности $h_{3\%}$ определяются в соответствии с официальными справочными данными, содержащими сведения по долгосрочным распределениям режимов волнения из условия их наблюдения не более одного-двух дней в сезон (3 мес.), т. е. зависят только от долгосрочных характеристик волнения и не связаны с назначенным для судна ограничением по волнению. Также в Правилах оговаривается, что при желании получить более точные значения сил допускается уточнять их по результатам полного расчета качки.

Правилами Bureau Veritas (BV), Lloyd's Register (LR), DNV-GL, так же, как и Правилами РС, регламентируются все составляющие ускорений, используемые при назначении местных нагрузок. Однако во всех рассмотренных нормативных документах как для определения ускорений при различных видах качки судов, так и для определения суммарных ускорений по вертикальному, поперечному и горизонтальному направлениям, используются различные зависимости.

Расчетные амплитуды качки судна, регламентируемые нормативами классификационных обществ — членов МАКО и РС применительно к судам неограниченного района плавания, ориентированы на Международную конвенцию о грузовой марке (КГМ-66/88). Учет особенностей эксплуатации судов ограниченного района плавания, в свою очередь, выполняется в соответствии с национальными требованиями в зависимости от устанавливаемых эксплуатационных ограничений. При этом требования классификационных обществ основаны на различных подходах к обеспечению безопасности плавания таких судов при уменьшенных по сравнению с судами неограниченного района плавания эксплуатационных ограничениях и, как следствие, требованиях к мореходным характеристикам (прочность, остойчивость, надводный борт).

Целесообразно подробнее рассмотреть требования ведущих классификационных обществ, под наблюдением которых находятся суда, аналогичные российским судам смешанного и внутреннего плавания:

РС. Правилами РС устанавливается допустимое удаление от места убежища в зависимости от типа моря (закрытое или открытое), а для судов смешанного *река – море* плавания *R3-RSN* регламентированы границы разрешенных географических районов и сезоны эксплуатации. Также для судов ограниченного и смешанного (*река – море*) плавания предусмотрено ограничение по разрешенному режиму волнения.

BV. В Правилах BV для судов ограниченных районов плавания устанавливается допустимое удаление судов от мест убежища в зависимости от зон (зимняя, летняя, тропическая), определенных в КГМ-66/88.

LR. В качестве эксплуатационных ограничений в Правилах LR регламентированы такие факторы, как разгон ветра, закрытая вода (акватория, где разгон составляет 6 морских миль или менее), приемлемая погода (сила ветра шесть баллов или менее по шкале Бофорта, в достаточной степени связанная с состояниями моря так, чтобы гарантировать, что забортная вода попадает на палубу судна только через редкие промежутки времени или вообще не поступает). Однако каких-либо конкретных смягчающих коэффициентов для таких ограничений не приводится. Лишь при определении общих волновых нагрузок оговаривается, что учитывающий условия плавания коэффициент может приниматься не менее 0,5 к соответствующим нагрузкам, регламентируемым для судов неограниченного района плавания.

DNV-GL. В документах DNV-GL, зачастую применяемых на практике при решении вопросов о креплении КТГ при совершении длительных или международных перевозок, отмечается, что полученные из Правил DNV-GL для классификации судов ускорения основаны на нагрузках, имеющих вероятность 10^{-8} . Эта обеспеченность представляется завышенной для морских операций, имеющих, как правило, единичный характер. В связи с этим оговаривается возможность уменьшения уско-

рений, используемых для назначения максимальных ожидаемых (расчетных) волновых нагрузок, с учетом фактических условий проведения операции. В этом случае допустимое уменьшение расчетных ускорений определяется длиной судна L и длительностью операции $T_{пор}$. Регламентируемые Правилами DNV-GL редукционные коэффициенты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Редукционные коэффициенты, назначаемые к расчетным ускорениям

$T_{пор}$, сут.	$T_{пор} \leq 7$	$7 < T_{пор} \leq 30$	$30 < T_{пор} \leq 180$	$T_{пор} > 180$
Без ограничений	0,67	0,67	0,80	1,0
Суровые условия	0,67	0,80	0,90	1,0

При этом Правилами DNV-GL оговаривается, что для транспортных средств, которые должны укрываться в местах убежища в случае прогнозирования экстремальных погодных условий, может применяться коэффициент при продолжительности операции $T_{пор} \leq 7$ сут. Приведенные в табл. 1 значения редукционных коэффициентов применимы для судов длиной 100 м и более. Для судов длиной менее 50 м уменьшение расчетных ускорений не допускается, а для промежуточных длин судов определяется линейной интерполяцией.

Правилами DNV-GL также предусмотрена принципиальная возможность введения дополнительного ограничения по волнению на конкретную перевозку. При этом значительная высота волны h_s^1 в случае необходимости может быть уменьшена до $h_s = 6,0$ м ($h_{3\%} = 8,0$ м) или $h_s = 4,0$ м ($h_{3\%} = 5,3$ м).

Необходимо обратить внимание, что для условий перевозки на ВВП и в защищенных водах период амплитуды и вертикальные ускорения при качке нормативами DNV-GL не регламентируются, а расчетные нагрузки в каждом направлении принимаются как наибольшие, определяемые из следующих статических воздействий на судно, а именно:

- $0,1g$ статической нагрузки параллельно палубе;
- статического крена, вызванного расчетным ветром;
- наибольшего крена при повреждении одного отсека.

Следует отметить, что на основе результатов анализа, выполненного в статье [9] на основе работы [10], показана схожесть подходов к классификации внутренних водных бассейнов, используемых при разработке Правил РКО и европейских нормативных документов [11]. Таким образом, по результатам выполненного анализа отмечается, что подходы к назначению расчетных ускорений, используемых при определении нагрузок на средства крепления при перевозке КТГ в российских и иностранных нормативных документах для судов ограниченных районов плавания существенно отличаются, что связано в первую очередь с несопоставимыми регламентируемыми эксплуатационными ограничениями.

Результаты (Results)

В большинстве случаев расчетные ускорения при качке назначаются с учетом долгосрочных характеристик волнения в разрешенных районах плавания, а также в ряде случаев зависят от устанавливаемых ограничений по допустимому для эксплуатации режиму волнения. Однако в последнем случае, как правило, рассматриваемые в документах^{2,3} ограничения по волнению существенно превышают значения, актуальные для судов с классом РКО при их эксплуатации на ВВП и в ограниченных прибрежных морских районах. В связи с ранее изложенным опыт нормирования

¹ Значительная высота волны h_s представляет собой среднюю высоту волны из 1/3 наиболее высоких волн в рассматриваемом режиме волнения. Из соотношения закона Релея, справедливого на установившемся волнении на глубокой воде, $h_{3\%} = 1,33h_s$.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II: Корпус. НД № 2-020101-174. СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2023.

³ DNV-GL. Noble Denton Marine Services. DNVGL-ST-N001.

амплитуд качки и ускорений, непосредственно связанных с нагрузками на средства крепления КТГ, в рассмотренных ранее нормативных документах различных классификационных обществ, по всей видимости, неприменим к задаче назначения расчетных нагрузок, осуществляющих их перевозку на ВВП РФ при достаточно жестких погодных ограничениях.

Для решения рассматриваемой задачи выполнены прямые расчеты качки для пяти проектов судов-представителей, для которых АО «ЦНИИМФ» ранее выполнялись проекты перевозки КТГ в различных условиях. Необходимо отметить, что такой подход к назначению расчетных нагрузок на средства крепления при перевозке КТГ предусмотрен различными нормативными документами, в том числе Правилами морской перевозки КТГ².

Сведения по выбранным судам-представителям приведены в табл. 2. Для каждого проекта расчеты выполнялись для случаев загрузки на полную осадку по грузовую марку, а также для частичной загрузки. Также для каждого проекта был определен расчетный диапазон значений метацентрической высоты (МЦВ), при этом верхняя граница диапазона определялась как наибольшая МЦВ, при которой выполняются требования к остойчивости судна, регламентируемые Правилами РКО. Нижняя граница МЦВ расчетного диапазона соответствует эксплуатационному случаю загрузки судна, принятому на основе анализа имеющихся проектов перевозки КТГ на рассматриваемых судах-представителях.

Таблица 2

Основные сведения по судам-представителям

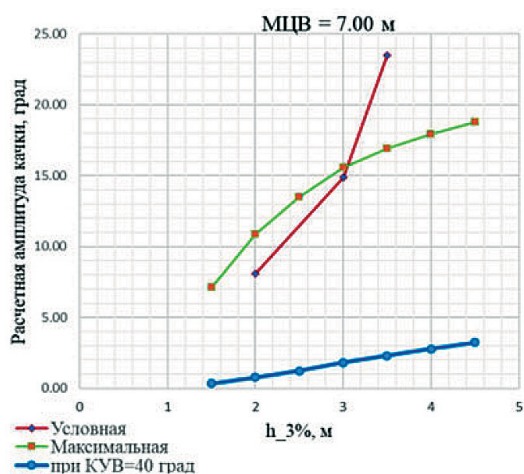
Характеристики	Проекты судов				
	326,1	P168	2–95A/R	16801	SP8916
Длина, м	82,0	84,0	114	85,7	89,25
Ширина, м	11,94	12,3	13	16,5	16,5
Высота борта, м	4,0	3,5	5,5	3,3	4,5
Осадка (в грузу), м	3,35	2,63	3,77	2,25	3,2
Водоизмещение (в грузу), т	2670	2310	4646	2840	4415
Осадка (частичная загрузка), м	1,76	1,83	2,6	1,75	2,2
Водоизмещение (частичная загрузка), т	1320	1560	3108	2160	2950

Расчеты амплитуд качки для режимов волнения $h_{3\%}$ в диапазоне 1,5–4,5 м и при различных курсовых углах (КУВ) по отношению к основным распределениям направления развития волнения (0–180° через 10°) выполнялись с использованием программного обеспечения SafeSea «Оценка и выбор безопасных режимов штормового плавания» (Свидетельство о гос. регистрации программы № 2009612756), разработанной в АО «ЦНИИМФ». Используемый для расчетов диапазон режимов волнения $h_{3\%}$ соответствует ограничениям по волнению, регламентируемым Правилами РРР для судов внутреннего и смешанного плавания различных классов.

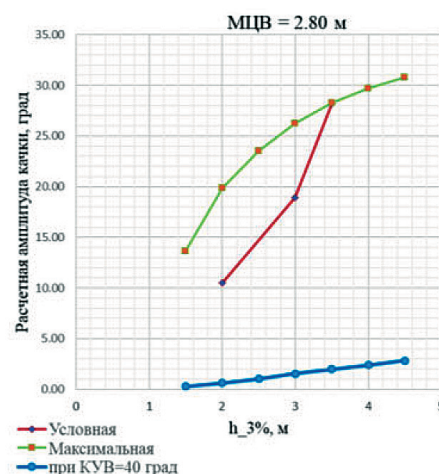
Расчетные (условные) амплитуды качки, регламентируемые Правилами РКО, для каждого из указанных судов-представителей при вариации МЦВ в указанных ранее границах и $h_{3\%}$ определялись по программе StabEdit «Разработка оптимального грузового плана судна с расчетами посадки, остойчивости и прочности» (Сертификат об одобрении компьютерного приложения № 26 от 28.04.2017 г.). В качестве примера на рисунке приведены результаты расчета амплитуд качки, полученные на основе результатов прямых расчетов и согласно Правилам РКО при полной загрузке для судна-площадки пр. 16801 (МЦВ = 7,0 м) и трюмного судна пр. P168 (МЦВ = 2,8 м).

Результаты выполненных расчетов показали, что для судов классов «О», «О-ПР», «М» и «М-ПР» для большинства рассматриваемого диапазона изменения МЦВ полученные амплитуды качки по программе SafeSea в ряде случаев оказываются выше регламентируемых для судов указанных классов РКО эксплуатационных ограничений.

а)



б)



Сравнение амплитуд качки:

а — для баржи-площадки пр. 16801; б — для трюмного судна пр. P168

Для судов указанных классов при назначении амплитуды качки, предложенной для определения ускорений при расчете прочности креплений КТГ, рекомендуется применять условные расчетные амплитуды качки, регламентируемые Правилами РКО, на класс выше, т. е. для судов классов «Р» — в соответствии с требованиями для судов класса «О», для судов классов «О» и «О-ПР» — как для судов классов «М» («М-ПР»), для судов классов «М» («М-ПР») — как для судов класса «М-СП».

Учитывая практику, используемую DNV-GL при назначении нагрузок от перевозимого груза на ВВП и в защищенных водах, для судов класса «Р» или более высокого класса, выполняющих перевозку КТГ в бассейнах разряда «Р» с ограничением по допустимому режиму волнения $h_{1\%} \leq 1,2 \text{ м}$, значения нагрузок рекомендовано определять как нагрузку от статического крена, принимаемого наибольшим из следующих:

- от статического действия ветра при условном расчетном статическом давлении ветра, регламентированном Правилами РКО для судов класса «Р»;
- от крена, возникающего при затоплении каждого отсека в отдельности.

В качестве альтернативы предлагаемого увеличения расчетной амплитуды качки для судов классов «О» («О-ПР») и «М» («М-ПР»), используемой для определения ускорений при перевозке КТГ в бассейнах соответствующих разрядов, допускается возможность предусмотреть уменьшение допустимой высоты волны на 0,5 м по сравнению с предусмотренной классом судна. По результатам анализа для судов класса «М-СП» предложено не предъявлять дополнительные требования к амплитуде качки по отношению к регламентируемой Правилами РКО к условной расчетной амплитуде качки для судов этого класса. Также, по аналогии с рядом других нормативных документов, полагается возможным амплитуды качки, используемые для разработки требований к креплению КТГ, определять на основании специальных расчетов, выполненных по согласованным с РКО программам.

При разработке требований РКО к расчетным ускорениям, используемым при назначении нагрузок на средства крепления КТГ, необходимо определиться с расчетными значениями периодов качки. В практике РС при определении расчетных ускорений при качке в качестве периода T_b используется период качки, определяемый согласно следующей зависимости:

$$T_b = cB / h. \quad (1)$$

В общем виде в Правилах РС (ч. «Корпус») рекомендуется принимать $c = 0,8$, $h \approx 0,07B$. Эти приближенные значения c и h ориентированы, по всей видимости, на традиционные морские суда. При этом в ч. «Остойчивость» РС при проверке остойчивости по критерию погоды для определения

периода качки применяется аналогичная (1) зависимость для определения периода качки с использованием следующих зависимостей по назначению параметров h и c , а, именно:

h — исправленная метацентрическая высота с поправкой на свободные поверхности жидких грузов, м;

c — числовой коэффициент, определяемый по формуле

$$c = 0,373 + 0,023B/d - 0,043L_w/100, \quad (2)$$

где d — осадка судна, м;

L_w — длина судна по ватерлинии, м.

Расчетные периоды качки по формулам, аналогичным указанным в Правилах РС, определяются также и в международном кодексе¹, в котором отмечается, что периоды качки, определяемые по приведенным ранее зависимостям (1) и (2), соответствуют собственным периодам качки. Однако в отличие от рассматриваемых нормативных документов, в нормативной базе РКО не приводятся зависимости для определения периодов качки. С учетом ранее изложенного была выполнена оценка собственных и вынужденных периодов качки указанных судов-представителей (см. табл. 2) с обводами корпуса, характерными как для судов внутреннего плавания, так и схожими с традиционными морскими судами.

Анализ качки объектов под воздействием внешних нагрузок выполнялся с помощью специализированного программного комплекса Anchored Structures (рассматривалось положение судна лагом к волне). Для каждого из рассматриваемых судов-представителей для указанных ранее диапазонов изменения МЦВ и $h_{3\%}$ были выполнены расчеты собственного периода бортовой качки $T_{\text{собств}}$ и периода вынужденной качки, реализованной на волнении заданной интенсивности $T_{\text{вынужд}}$. Результаты расчетов показали удовлетворительное согласование собственных и вынужденных периодов качки. Так, для рассмотренного диапазона МЦВ применительно к рассматриваемым проектам судов при диапазоне режимов волнения $1,5 \text{ м} \leq h_{3\%} \leq 4,5 \text{ м}$ максимальное превышение собственных периодов качки от вынужденных не превышает 2,6 %. В большинстве случаев собственные периоды качки несколько меньше вынужденных. В этом случае максимальное различие составляет 9,4 %.

Результаты выполненных расчетов показали также удовлетворительное совпадение прямого расчета собственных периодов бортовой качки с соответствующими периодами, выполненного по зависимостям (1), (2), в соответствии с регламентированными нормативными документами^{6,7}, которые были приняты в качестве расчетных при разработке требований РКО.

Определение линейных ускорений при бортовой качке судов в вертикальном и горизонтально-поперечном направлениях предложено определять по следующим формулам, использованным для этой цели в Правилах РС:

— на вертикальное направление:

$$a_{bz} = (2\pi / T_b)^2 \theta y_0; \quad (3)$$

— на горизонтально-поперечное направление:

$$a_{by} = (2\pi / T_b)^2 \theta z_0, \quad (4)$$

где y_0, z_0 — отстояние рассматриваемой точки от диаметральной плоскости и от горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести судна, соответственно, м;

θ — расчетный угол качки, рад.;

T_b — период бортовой качки, сек.

Примечание. Значения θ и T_b при использовании этих зависимостей определяются с учетом приведенных ранее рекомендаций.

Дополнительно рассмотрен вопрос о нормировании ускорений при продольной качке судов. Анализ имеющихся исследований показал, что в отличие от бортовой килевая качка для судов с характерными для судов внутреннего и смешанного плавания практически не исследовалась.

¹ Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОНС 2008 года). 76 с.

Однако ускорения при этом виде качки создают дополнительные нагрузки на корпусные конструкции и средства крепления КТГ, в первую очередь, для судов высоких классов РКО («М», «М-ПР», «М-СП»). С учетом изложенного ранее, предложено при нормировании нагрузок от перевозимых КТГ при продольной качке судна ориентироваться на соблюдение требований Правил РС для сопоставимых классов, а именно:

– для судов классов «М» и «М-ПР» — для судов РС с символом ограничения района плавания $R3$;

– для судов классов «М-СП3,5» и «М-СП4,5» — для судов РС с символом ограничения района плавания $R3-RSN$ и $R2-RSN(4,5)$.

Для судов низких классов («Р», «О», «О-ПР») килевую качку предложено не учитывать по аналогии с требованиями DNV-GL для судов, эксплуатируемых на ВВП и в защищенных водах.

С учетом ранее изложенного предложены следующие расчетные зависимости к нормированию ускорений при продольной качке:

– ускорение в горизонтально-продольном направлении:

$$a_x = (2\pi/T_k)^2 \psi z_0; \quad (5)$$

– ускорение в вертикальном направлении при килевой качке:

$$a_z = (2\pi/T_k)^2 \psi x_0, \quad (6)$$

где z_0, x_0 — отстояние рассматриваемой точки от горизонтальной плоскости и от поперечной плоскости, проходящей через центр тяжести судна, соответственно, м;

ψ — расчетная амплитуда килевой качки, рад., определяемая в соответствии с указаниями Руководства РС;

T_k — период килевой качки, с.

Расчетную амплитуду килевой качки предлагается определять по следующей зависимости:

$$\psi = 0,23\alpha / (1 + L \cdot 10^{-2}), \quad (7)$$

где $\alpha = 0$ — для судов классов «Р», «О» и «О-ПР»;

$\alpha = 0,60 - 0,20L \cdot 10^{-2}$ — для судов классов «М», «М-ПР»;

$\alpha = 0,71 - 0,22L \cdot 10^{-2}$ — для судов класса «М-СП3,5»;

$\alpha = 0,92 - 0,22L \cdot 10^{-2}$ — для судов класса «М-СП4,5».

Коэффициент α формулы (7) получен из указанных ранее соотношений для судов с различными символами ограничений районов плавания РС.

Период килевой качки определяется по следующей формуле:

$$T_k = \frac{0,8\sqrt{L}}{1 + 0,4V_0(L \cdot 10^{-3} + 0,4) / \sqrt{L}}, \quad (8)$$

где V_0 — наибольшая скорость судна на тихой воде, уз., при осадке по ватерлинию, соответствующая посадке судна при перевозке КТГ и номинальной мощности энергетической установки.

В качестве запасов прочности элементов креплений КТГ предложено использовать рекомендации, приведенные в анализируемых в данной работе Руководстве и Правилах РС, разработанных АО «ЦНИИМФ».

Выводы (Summary)

На основе выполненного в работе исследования можно сделать следующие выводы:

1. Исследование применяемых в международных нормативных документах подходов к регламентированию расчетных ускорений при качке судов при перевозке КТГ показало, что такие методики в российских и зарубежных источниках имеют существенные различия, что объясняется разницей в эксплуатационных ограничениях судов. При этом действующие в нормативных документах методики не учитывают особенности эксплуатации судов внутреннего и смешанного плавания, а ориентированы на морские суда.

2. Выполненные расчеты амплитуд качки для судов — представителей внутреннего и смешанного плавания, на которых ранее выполнялась перевозка КТГ, позволили разработать предложения по нормированию расчетных ускорений при качке судна, перевозящего КТГ. Результаты выполненного исследования реализованы в проекте «Руководства по назначению расчетных ускорений при качке судов внутреннего и смешанного (*река — море*) плавания и запасов прочности конструкций крепления крупногабаритных тяжеловесных грузов», которое прошло обсуждение на корпусной секции Научно-технического совета при ФАУ РКО и рекомендовано к внедрению в нормативную базу РКО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синицын М. Г. Оценка транспортных возможностей внутренних водных путей / М. Г. Синицын, Г. Я. Синицын // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 189–197. DOI: 10.37890/jwt.vi72.284.
2. Остапарченко Е. А. Определение транспортных рисков при перевозке крупногабаритных и тяжеловесных грузов / Е. А. Остапарченко // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: в 2 т. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — Т. 2. — С. 76–83.
3. Шабров В. Н. Обоснование эффективности комбинированных перевозок автомобилей с участием речного транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / В. Н. Шабров. — Н. Новгород, 2017. — 181 с.
4. Роменкова В. А. Современные архитектурно-конструктивные типы судов для перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов / В. А. Роменкова, А. Д. Бурменский // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: 06–10 апреля 2020 года. — Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2020. — В 3 ч. — Ч. 1. — С. 446–448.
5. Буров В. И. Основные проблемы и пути их решения, возникающие при мультимодальной перевозке крупногабаритных и тяжеловесных грузов из стран ближнего и дальнего зарубежья в регионы Российской Федерации / В. И. Буров // Транспортное дело России. — 2017. — № 4. — С. 106–108.
6. Егоров Г. В. Анализ состояния и путей развития внутреннего водного транспорта России / Г. В. Егоров, Ю. И. Матвеев, Г. Н. Чуплыгин, В. Н. Шабров // Речной транспорт (XXI век). — 2021. — № 3 (99). — С. 39–44.
7. Костров В. Н. Анализ современного состояния и перспектив развития перевозок крупногабаритных и тяжеловесных грузов на водном транспорте / В. Н. Костров, Р. С. Крайнов // Транспорт. Горизонты развития: труды 1-го Междунар. науч.-промышл. форума. — Н. Новгород: Волжский гос. ун-т водного транспорта, 2021. — С. 8.
8. Онищенко И. С. Назначение эксплуатационных ограничений для судов портового плавания на внутренних водных путях / И. С. Онищенко, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 455–463. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-455-463.
9. Онищенко И. С. Сопоставление подходов Российского Речного Регистра и Европейской экономической комиссии к определению разрядности внутренних водных бассейнов: сб. науч. тр. АО «ЦНИИМФ» / И. С. Онищенко, А. Н. Паранюк. — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2021. — С. 130–135.
10. Сравнительный анализ требований Правил Российского Речного Регистра и Европейских предписаний к судам внутреннего плавания: отчет по теме. — М.: ФГУ «Российский Речной Регистр», Центр разработки правил, 2009. — 409 с.
11. Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предложений, применимых к судам внутреннего плавания / Резолюция № 61. — Организация Объединенных Наций, 2006. — 242 с.

REFERENCES

1. Sinitsyn, M. G., and G. Y. Sinitsyn. “Assessment of the transport capabilities of inland waterways.” *Russian Journal of Water Transport* 72 (2022): 189–197. DOI: 10.37890/jwt.vi72.284.
2. Ostaparchenko, E.A. “Opredelenie transportnykh riskov pri perevozke krupnogabaritnykh i tyazhelovesnykh грузов.” *Sbornik nauchnykh statei natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo*

sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova». Vol. 2. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2018. 76–83.

3. Shabrov, V. N. Obosnovanie effektivnosti kombinirovannykh perevozok avtomobilei s uchastiem rechnogo transporta. PhD diss. N. Novgorod, 2017.

4. Romenkova, V. A., and A. D. Burmenskiy. “Modern architectural-constructive types of vessels for transportation of large and heavy cargo.” *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: Materialy III Vserossiiskoi natsional'noi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Vol. Chast' 1. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi universitet, 2020. 446–448.

5. Burov, V. “The main problems and solutions to them arising from the multimodal transportation of bulky and heavy cargo from the near and far abroad to the regions of the Russian Federation.” *Transport business of Russia* 4 (2017): 106–108.

6. Egorov, G., Y. Matveev, G. Chuplygin, and V. Shabrov. “The analysis of condition and ways of development of inland water transport in Russia.” *River transport (XXIst century)* 3(99) (2021): 39–44.

7. Kostrov, V. N., and R. S. Krainov. “Analysis of the current state and prospects for the development of large and heavy cargo transportation by water transport.” *Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy I-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma*. Nizhnii Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2021.

8. Onishchenko, Irina S., and Vladimir V. Karetnikov. “Designation of operational restrictions for harbour ships on inland waterways.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 455–463. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-455-463.

9. Onishchenko, I.S., and A. N. Paranyuk. “Sopostavlenie podkhodov Rossiiskogo Rechnogo Registra i Evropeiskoi ekonomicheskoi komissii k opredeleniyu razryadnosti vnutrennikh vodnykh basseinov.” *Sbornik nauchnykh trudov AO “TsNIIMF”*. SPb.: AO “TsNIIMF”, 2021. 130–135.

10. Sravnitel'nyi analiz trebovaniy Pravil Rossiiskogo Rechnogo Registra i Evropeiskikh predpisaniy k sudam vnutrennego plavaniya. Report. M.: FGU «Rossiiskii Rechnoi Registr», Tsentr razrabotki pravil, 2009.

11. *Recommendations on Harmonized Europe-wide Technical Requirements for Inland Navigation Vessels. Resolution No. 61, Revision 2*. Geneva: United Nations, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Онищенко Ирина Станиславовна —
заведующий сектором, аспирант
Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
АО «ЦНИИМФ»
191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А
e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru
Черейский Игорь Зиновьевич —
заместитель генерального директора
АО «ЦНИИМФ»
191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А
e-mail: Stabedit@cniimf.ru
Гуляев Илья Александрович —
кандидат технических наук,
начальник корпусного отдела
ФАУ «Российское Классификационное общество»
109240, Российская Федерация, г. Москва,
Яузская улица, д. 12
e-mail: guliaev@rfclass.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Onishchenko, Irina S. —
Head of Sector, postgraduate
Supervisor:
Karetnikov, Vladimir V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
CNIIMF, JSC
6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,
Russian Federation
e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru
Chereysky, Igor Z. —
Deputy General Director
CNIIMF, JSC
6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,
Russian Federation
e-mail: stabedit@cniimf.ru
Gulyaev, Ilya A. —
PhD,
Head of Hull Department
Russian Classification Society
12, Yauzskaya Str., Moscow, 109240,
Russian Federation
e-mail: guliaev@rfclass.ru

Статья поступила в редакцию 26 октября 2023 г.
Received: October 26, 2023.

THE PROBLEM OF IMPLEMENTING THE CONCEPT OF MAXIMUM INTEGRATION OF HETEROGENEOUS DATA IN PRACTICAL NAVIGATION

I. V. Yuyukin

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

The topic of the work is the research of the problem of the practical realization of opportunistic navigation, which actually consists in the fact that the “signals of opportunity” are not optimized for global navigation according to their original purpose. A hypothesis about the possibility of strategic application of the navigation concept based on the principles of data integration with the objective existence of tactically surmountable difficulties is put forward. In the conditions of vulnerability of the global satellite system, an approach to use an additional source of combined signals in order to continuously ensure accurate geolocation of water transport vehicles is proposed. The comparative assessment confirms the comparability of the positioning error of alternative navigation with the data of classical satellite observations of mobile objects. An assumption about the effectiveness of spline modeling of the cartographic standard of informativeness for the practical organization of the basic principle of opportunistic positioning by analogy with the paradigm of correlation-extreme navigation is made. A computer visualization of a fixed fragment of the ocean gravitational field based on spline approximation is performed in order to optimize the problem of simultaneous localization and three-dimensional representation of the ship movement in a graphical environment unaffiliated with foreign software. A hybrid algorithm for mathematical synthesis of the navigational isosurface has been tested as a harmonized support for the navigation staff to implement the “terrain-referenced procedure” in the landscape coordinate space. The variants of the “ambiguity resolution” problem implementation in the issue of maximum integration of heterogeneous navigation data are considered. The probability of practical use of the opportunistic navigation postulates in marine applications, taking into account the “navigation gap” factor for leveling local satellite incapacity with a real possibility of countering malicious interception of ship control, is estimated. The expediency of using the factor of observational reckoning of the vessel path as an additional condition for navigation safety in the aspect of packet processing of the “signals of opportunity” slot is substantiated.

Keywords: opportunistic navigation, “signals of opportunity”, geolocation, “terrain-referenced procedure”, “ambiguity resolution”, “navigation gap”, observational reckoning.

For citation:

Yuyukin, Igor V. “The problem of implementing the concept of maximum integration of heterogeneous data in practical navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.

УДК 656.61.052

ПРОБЛЕМА РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ МАКСИМАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ В ПРАКТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

И. В. Ююкин

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

Темой работы является исследование проблемы практической реализации оппортунистической навигации, которая фактически заключается в том, что «сигналы возможностей» по оригинальному предназначению не оптимизированы для глобальной навигации. Выдвинута гипотеза о возможности стратегического применения концепции навигации, основанной на принципах максимального интегрирования данных при активном существовании тактически преодолимых сложностей. В условиях уязвимости глобальной спутниковой системы предложен подход использования дополнительного источника комбинированных сигналов с целью непрерывного обеспечения точной геолокации средств водного транспорта. В сравнительной оценке подтверждена сопоставимость погрешности позиционирования альтернативной навигации с данными клас-

сических спутниковых наблюдений мобильных объектов. Сделано предположение об эффективности сплайнового моделирования картографического эталона информативности для практической организации базового принципа оппортунистического позиционирования по аналогии с парадигмой корреляционно-экстремальной навигации. Выполнена компьютерная визуализация фиксированного фрагмента гравитационного поля океана на основе сплайн-аппроксимации с целью оптимизации задачи одновременной локализации и трехмерного отображения движения судна в неаффилированной с зарубежным программным обеспечением графической среде. Гибридный алгоритм математического синтеза навигационной изоповерхности апробирован в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу для реализации «процедуры привязки к местности» в ландшафтном пространстве координат. Рассмотрены варианты реализации проблемы «разрешения неоднозначности» в процессе решения вопроса максимального интегрирования разнородных навигационных данных. Выполнена оценка вероятности практического использования постулатов оппортунистической навигации в морских приложениях с учетом фактора «навигационного пробела» для нивелирования локальной спутниковой недееспособности при реальной возможности противодействия злоумышленному перехвату контроля управления судном. Обоснована целесообразность применения фактора наблюдационного счисления пути судна как дополнительного условия безопасности судовождения в аспекте пакетной обработки слота «сигналов возможностей».

Ключевые слова: оппортунистическая навигация, «сигналы возможностей», геолокация, «процедура привязки к местности», «разрешение неоднозначности», «навигационный пробел», наблюдационное счисление.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.

Введение (Introduction)

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) способствуют масштабной инновации в судовождении благодаря уникальному сочетанию дециметровой точности определения координат, глобальной доступности информации в любой точке на земной поверхности в любое время и при любых метеоусловиях [1]. Однако использование GPS в современных условиях не гарантирует постоянного выполнения для морских потребителей требования непрерывного получения координатно-временной информации без искажений. Переориентирование в условиях недоступности или недостоверности спутниковых систем на альтернативный помехоустойчивый вариант геолокации возможно при использовании автономных средств водного транспорта.

С целью нивелирования проблем ГНСС предлагается новый подход к позиционированию для преодоления ограничений спутниковой навигации. Представляется возможным использовать в судовождении потенциал авиационной концепции оппортунистической навигации для непрерывного местоопределения на основе микширования всех возможных радиочастотных сигналов с параллельной визуализацией высокоточной карты картографического ландшафта. Новая парадигма преодоления уязвимостей глобальной навигации заключается в максимальном комплексировании различных приемников с широким спектром радиочастотных сигналов в качестве дополнительной навигационной информации.

В условиях современности автономные транспортные средства ориентированы на постоянный поток сигналов и информации из внешних источников для локализации, планирования маршрута и ситуационной осведомленности о рисках, связанных с аномалиями позиционирования [2]. Стандартный подход включает использование информации о местоположении, навигации и времени, получаемой от GPS. Современные автономные транспортные средства уязвимы перед потерей или ослаблением каналов связи. Существует глобальная тенденция для увеличения радиочастотных помех как случайных, так и преднамеренных. Глушение и подмена гражданских спутниковых сигналов превратились из гипотетической угрозы в экспериментально подтвержденную проблему транспортной безопасности. В неблагоприятный момент, когда ГНСС становятся недоступными, подвижные объекты для успешного продолжения навигации могут использовать максимальную интеграцию мультисенсорных систем в рамках совместной радиосвязи с одновременным картографированием навигационной изоповерхности [3].

Современному судовождению необходима альтернативная надежная и безотказная система позиционирования, работающая повсеместно и в любое время с точностью, соответствующей назначению высокой миссии непрерывной всепогодной навигации. С первых попыток применения на практике онтологии оппортунистической навигации в 2010 г. при смоделированном эксперименте в австралийском центре робототехники Сиднейского университета максимальная погрешность определения местоположения первоначально составила 22 м [4]. Конфигурация оппортунистической навигации в данном испытании содержала информацию из числа 4–7 доступных «сигналов возможностей». Дальнейшее улучшение геометрии траекторий сигналов позволило увеличить точность позиционирования до 9 м, что является стимулирующим показателем необходимости разработки перспективных математических способов обработки навигационной информации в аспекте практического применения оппортунистической навигации на водном транспорте. Согласно результатам многовариантных экспериментов 2023 г. при финансовой поддержке Министерства транспорта США по оценке точности оппортунистической навигации погрешность геолокации мобильного средства составляет во всех случаях менее 10 м с наилучшим возможным показателем в 4,4 м [5]. Для морских приложений использование «сигналов возможностей» обеспечивает точность местопредельения не хуже 6 м согласно данным экспериментов двухгодичной давности [6]. Максимальное интегрирование сигналов улучшает точность навигации как процесса с обеспечением потенциальной точности в 10 м, аналогичной точности GPS по открытому коду для гражданских потребителей без использования дифференциального режима [7], [8].

По мере совершенствования автономных технологий стабильная и точная навигационная система становится обязательным условием безопасной и эффективной эксплуатации водного транспорта. В ходе практической реализации в морском приложении концепции максимального интегрирования разнородных навигационных данных сформулированы следующие задачи:

1. Оценка точности классического позиционирования GPS в сравнении с вариативными погрешностями геолокации оппортунистической навигации.
2. Анализ локальной недееспособности современных спутниковых систем с позиций постулата «навигационного пробела».
3. Уточнение фактора целостности как критерия оценки надежности и измерения уровня доверия к навигационной информации в системе мониторинга на основе технического оппортунизма для обеспечения точности позиционирования в режиме реального времени.
4. Синтезирование картографического эталона информативности фрагмента гравитационного поля океана в практическом приложении для реализации задачи одновременной локализации и графического отображения движения судна в трехмерном пространстве координат.
5. Модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче компьютерной анимации картографической составляющей оппортунистической навигации на основе использования методов сплайн-функций.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Использование пакетной радиосвязи является наиболее перспективной альтернативой GPS. Для реализации оппортунистической навигации коммуникационные портативные устройства, дополненные адаптированными датчиками для совместной геолокации, передают друг другу данные о наблюдениях в окружающей среде для увеличения объема сетевой информации с целью построения и постоянного уточнения глобальной ландшафтной карты позиционирования [9]. Обмен данными датчиков на единой интегрированной платформе помимо устранения недостатков ГНСС может обеспечить дальнейшее повышение производительности позиционирования.

Поле сигнальных данных предлагается размещать в виртуальном облаке, так что всякий раз, когда спутниковые данные становятся локально недоступными или ненадежными, мгновенное переориентирование на «сигналы возможностей» обеспечивает непрерывную точную навигацию с помощью синтезированного компьютерного картирования. Предлагается принципиально новая коммуникационная стратегия в судовождении для обмена комбинированной информацией,

согласно которой вместо передачи с фиксированной скоростью данные передаются только тогда, когда ошибка определения местоположения судна превышает заданный пользователем при существующих обстоятельствах плавания предельный порог допустимой погрешности с прогнозируемой вероятностью. В ходе эксперимента, демонстрирующего компромисс между производительностью локализации и концентрацией данных позиционирования, было выявлено, что применение инновационной системы связи позволило сократить совокупный объем транслируемой информации на 86,6 % по сравнению с традиционной схемой с фиксированной скоростью передачи информации [10]. Итоговая ошибка локализации после 30 с отсутствия GPS была уменьшена по сравнению с использованием только инерциальных систем с 55 м до 6 м при использовании оппортунистического варианта [11].

Оптимальным образом процесс интегрирования реализуется на базе нескольких приемников со случайной конфигурацией. Каждому приемнику можно приписать некоторые априорные знания о собственных состояниях из наблюдаемых данных. Датчики получают результаты наблюдения от каждого источника информации, объединенного с помощью центра слияния для оценивания текущего состояния всех источников информации. Практически выгодно уменьшить неопределенность полученных оценок состояния, однако во многих классических сценариях приемникам алгоритмически запрещено менять позиции, занимая более благоприятные местоположения для достижения наилучшего снижения неопределенности. Вместо этого, возможно, более эффективным решением могло быть задействование дополнительных источников сигналов.

Для повышения отказоустойчивого положения системы контроля оппортунистической навигации необходимо улучшить возможности обнаружения неисправностей. За счет интенсивности технической интеграции «сигналов возможностей» границы уровня системной защиты можно сделать меньшими, чем предлагаемые в настоящее время. Согласно представленным результатам моделирования было выявлено, что активация оппортунистической навигации сокращает разрывы между вертикальными и горизонтальными границами уровня кибернетической защиты более чем на 55 % и 70 %, соответственно, по сравнению с технологией использования спутниковых измерений [12]. Сокращение обеспечивает более высокую доступность системы мониторинга целостности контроля, позволяя навигационной системе соответствовать более строгим стандартам безопасности. По мере того как эти транспортные средства приближаются к полной автономии, точность и целостность их навигационной системы становятся все более ориентированными на использование «сигналов возможностей». В то время как понятие точности говорит само за себя, понятие целостности менее очевидно несмотря на то, что оно имеет первостепенное значение для оппортунистического применения на водном транспорте с точки зрения надежного обеспечения безопасности. При уточнении термина «целостность» его можно рассматривать как критерий для оценки надежности и измерения уровня доверия к информации, получаемой навигационной системой.

Навигационная система с высокой степенью целостности должна быть способна обнаруживать и отклонять ошибочные измерения, обеспечивая достоверность показателей работы системы в любое время. В определенной мере мониторинг целостности может быть обеспечен только с помощью ГНСС. Однако тип информации о целостности бесполезен для спутниковых приложений реального времени, поскольку коррекция выявленных аномалий GPS требует точного хронометража, чтобы идентифицировать сбой спутниковой службы и передать информацию для обеспечения синхронизации. Таким образом, альтернативные системы мониторинга на основе технического оппортунизма позволяют не только повысить надежность позиционирования как такового, но и обеспечить точность определения местоположения в режиме реального времени. Представляется целесообразным активно использовать фактор целостности в судовождении при разработке инновационных систем альтернативной навигации. К сожалению, сигналы спутниковой навигации гарантированно доступны не во всех средах. Чтобы решить эту проблему, исследуется возможность использования последовательностей графических изображений для навигации. Представляется логичным допущением применимость оппортунистического подхода

в вопросе определения места судна с позиций электронного картографирования в качестве перспективы использования в автономном судовождении.

Все методы интегрированной навигации требуют проведения трех основных операций: поиска местоположений на картографированном изображении, подходящего для отслеживания, сопоставления этих местоположений с ранее синтезированным изображением и прогностического вычисления результирующего движения мобильного объекта, позиционирование которого подлежит постоянному фиксированию [13], [14]. Метод сопоставления измерений с картографированным эталоном информативности корреляционно-экстремальной навигационной системы, по сути, является реализацией прямой географической «привязки» с использованием информации о местоположении и ориентации судна для геокодирования каждого пикселя или характерной точки, зафиксированной видеокамерой как варианта интегрированной обработки информации. Корреляционно-экстремальная навигационная система высокой помехозащищенности в оппортунистическом варианте, в которой используется взаимозависимость параметров геофизических полей Земли с географическими координатами судна, является реалистичной альтернативой GPS [15]. В процессе автономного судовождения измеряемые параметры планетарного геофизического поля постоянно сравниваются с априорным синтезированным эталоном методом совмещения изображений по критерию взаимной корреляции [16]. В связи с этим маршрутизация движения судна по профилю навигационной изоповерхности объединяет задачи математического восстановления карты геофизического поля и ориентирования по конкретным изолиниям, вдоль которых реализация характеристической изоповерхности сохраняет постоянные параметрические значения.

Совместное решение задач программируемого плавания с непрерывным оцениванием состояния совпадения виртуальной модельной карты геофизического поля с лучшей точностью, чем счисление пути судна, позволяет постоянно уточнять местоположение морского подвижного объекта с помощью специальной бортовой навигационной системы в качестве практической реализации обсервационного счисления в ситуации неточного совпадения профилей измеряемой навигационной изоповерхности с синтезированным эталоном картографирования. Под фактической обсервацией в нетрадиционном варианте понимается строгое совпадение смоделированного картографического фрагмента из оперативной памяти бортового компьютера с измеряемой рельефной перспективой.

В случае графических расхождений предлагается применение обсервационного счисления как метода определения координат судна, основанного на комплексном использовании информации, поступающих от автономных технических средств судовождения и данных, получаемых в результате непрерывного измерения навигационных параметров. В случае применения аналитического счисления, из-за графического несовпадения принципа позиционирования пакетной навигации, кратковременно прекращается выполнение задачи «привязки» к рельефному контуру местности и реализуется в полном объеме обсервационное счисление. Как следствие совместной обработки счислимых и обсервованных координат производится непрерывное уточнение позиционирования с точностью каждого последующего местоположения выше точности предыдущего за счет пассивного накопления навигационной информации. Поскольку измерения навигационных параметров выполняются автоматически частотным образом, линия пути в данном случае практически является геометрическим набором дискретных обсерваций. Традиционный метод письменного счисления, заключающийся в прогнозируемом вычислении координат судна по фактическим данным о направлении и скорости движения приобретает особую актуальность в аспекте практического применения парадигмы оппортунистической навигации в судовождении. Фактически предлагаемая реализация концепции обсервационного счисления представляет учет априорной информации о траекторной геометрии движения морского подвижного объекта при коррекции показателей навигационной системы по данным о конкретном геофизическом поле.

Точность определения местоположения пикселей, или характерных точек видеоизображения, при картографированной «привязки» в финальном варианте зависит от точности позиционирования мобильного объекта. Существует множество решений, использующих изображения с бортовой видео-

камеры для сопоставления объектов с эталонным изображением с целью вычисления глобального местоположения [17]. Для сходимости этих методов необходима относительно точная предварительная оценка местоположения. Любая спутниковая система обеспечивает долговременную высокую точность определения абсолютного положения и скорости потребителей, но при определенных обстоятельствах наблюдаются локальные аномалии в ее работе. При этом *инерциальная навигация* функционирует в любых средах, но точность позиционирования со временем ухудшается. Интегрированная система может использовать преимущества для уточненного определения траектории по местоположению, скорости и ориентации в евклидовом пространстве. Во время любого сбоя в работе ГНСС точность навигационного решения зависит исключительно от качества инерциальных датчиков. За последнее десятилетие поддержка местоопределения визуализированными изображениями является актуальной перспективой в мультисенсорной интегрированной навигации. Видеокамеры по своей сути обладают высокой пропускной способностью и, следовательно, имеют высокий потенциал для получения очень точного углового разрешения, а также они легкодоступны и просты в использовании для интерфейсной конфигурации.

Высокоточная инерциальная навигационная система с поддержкой изображений может быть предложена в качестве дополнительной альтернативы ГНСС в ситуации недоступности спутниковых навигационных систем. Опportunитическая интеграция, основанная на оптических методах, гарантирует надежность навигационной системы, даже если на изображениях наблюдается всего несколько характерных точек. Это может быть точечный объект, связанный с углом зрения, или изолиния информативного участка на электрооптическом изображении для поддержки функционирования опportunитической системы. Глобальный анализ наблюдаемости технической интеграции информационных данных гарантирует, что инновационная навигационная система является дееспособной при любых условиях. Экспериментальное моделирование показало, что интегрированные решения с высокой точностью определения местоположения на уровне сантиметра и ориентации на уровне половины градуса могут быть достигнуты для гравитационно-инерциальной системы [18].

ГНСС не может устойчиво работать в урбанизированных условиях, где спутниковые сигналы могут быть заблокированы, или в помещениях, где сигналы могут быть недоступны. Навигация с использованием изображений для непрерывной геолокации может представлять реальную альтернативу спутниковой технологии позиционирования. Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что измеряемые параметры геометрических изображений постоянно сравниваются с предварительно созданным характеристическим эталоном по аналогии с корреляционно-экстремальной навигацией [19]. С позиций данного подхода маршрутизация движения судна объединяет задачи математического восстановления карты навигационных изображений и ориентирования аналогично изолинейному плаванию по постоянным параметрическим значениям. Задача программируемой маршрутизации судна предполагает постоянное уточнение местоположения морского подвижного объекта с помощью специальной бортовой аппаратуры при дискретном измерении параметров графических изображений и их точном сопоставлении с навигационными данными.

Такие датчики изображения как, например, видеокамеры, которые не подвержены блокировке спутникового сигнала, как правило, имеют низкую стоимость и обеспечивают эффективные измерения в виде характерных точек в любых условиях. Измерения изображения, полученные с помощью видеокамеры, позволяют откалибровать и ограничить изменяющиеся во времени инерционные погрешности. Расстояние от камеры до объекта как фактор восприятия глубины изображения представляет собой ключевой аспект перспективной навигации. Оснащение одной видеокамеры небольшим подвесным лазерным датчиком дальности позволяет транспортному объекту устойчиво ориентироваться в пространстве без использования GPS. Оптические датчики, по сути, обладают высокой пропускной способностью, что позволяет получить очень точное измерительное разрешение. Цифровые изображения легкодоступны и просты, что позволяет использовать их в качестве практичного решения для исследования навигационного потенциала. В результате фиксации видеокамерой фактического изображения алгоритм сравнивает предсказанный образ с ожидаемым. Прогностический рендеринг организует направление активных исследований в области навигации

с использованием средств визуализации на основе корреляции обработки изображений между прогнозируемыми и истинными изображениями как допустимую степень совпадения двух изображений.

Позиционирование на базе компьютерных изображений может обеспечить высокую точность при применении характерных точек в зоне близкого расстояния. Аналогичным образом обнаруживаются и сопоставляются признаки между последовательными кадрами изображения, чтобы восстановить относительные изменения в положении и ориентации объектов. Типичные системы данного типа включают одновременное определение визуального местоположения и картографирование ландшафтного пространства навигационных данных. После объединения с инерциальными датчиками навигационная система с поддержкой изображений способна преодолевать ограничения и недостатки автономной системы. В конечном итоге объекты на относительных компьютерных изображениях сопоставляются с абсолютными объектами в реальном мире, координаты которых известны в навигационной среде. Результаты практических испытаний показали, что точность определения местоположения инерциальных встроенных датчиков с использованием изображений составляет примерно два сантиметра, даже если при визуализации доступна только одна характерная точка [18].

В визуальной морской навигации становится возможным реализовать новый подход к решению сложной задачи геолокации с использованием сопоставления изображений в структурированной базе данных эталонных графических сценариев. Обсервация в новой трактовке рассматривается как проблема кластеризации локальных объектов изображения взамен эвристических подходов. Структурный принцип инновационной навигации основан на корреляционных функциях, позволяющих фрагментарно сопоставлять изображения. Для каждого локального объекта на изображении запроса сравнения находятся его приблизительные ближайшие соседние геометрические фрагменты с последующей прогнозируемой перегруппировкой объектов из эталонных базовых изображений на основе использования кластеризации доминирующего набора визуализированных образов с максимальным совпадением контура графики. Методы, основанные на локальных характеристиках, определяют точное соответствие геометрических объектов как ориентиров в сцене слежения по нескольким оптическим кадрам.

Предлагаемый интегрированный подход может обладать потенциалом для относительно долговременной и точной морской навигации в качестве альтернативы GPS. Комбинированные системы будут непрерывно предоставлять пользователю точную информацию о местоположении, ориентации, скорости и хронометраже. Инновационные методы применения «сигналов возможностей» на основе усовершенствованных алгоритмов оппортунистической интеграции данных могут быть активно использованы в перспективе для решения сложных задач непрерывного морского позиционирования.

Результаты (Results)

Перспективным направлением реализации оппортунистической навигации в морских приложениях является автономная навигация подвижных объектов с использованием данных о гравитационном поле Земли. Автономные подводные аппараты традиционно используют инерциальную навигационную систему в качестве основного устройства для возможности выполнения долгосрочного плавания. В подводных ситуациях спутниковые методы навигации ограничены из-за сложности и изменчивости подводной среды. Гравитационно-инерциальная навигационная система, обеспечивающая высокоточное определение местоположения, является передовой технологией подводной навигации. Безальтернативность данного метода в качестве дополнения к инерциальной навигации при отсутствии сигналов спутниковых навигационных систем обуславливает его развитие в будущем [20]. Инерциальная навигационная система с гравитационным управлением представляет важную разработку в области автономной навигации подводных аппаратов.

Аналогичный вариант подводной навигации использует специальный алгоритм сравнения измерений гравиметром гравитационных аномалий в текущем положении с синтезированными данными гравитационного поля для постоянной коррекции положения подвижного объекта. Математический аппарат базисных сплайнов позволяет создать для оппортунистического способа навигации надежную

картографическую основу. Представляется целесообразным подход синтезирования геофизического графического профиля на основе методов сплайн-функций с целью повышения геометрической схожести аппроксимированной гравитационной поверхности для дальнейшего усиления точности позиционирования при использовании оппортунистической навигации в морских приложениях. В качестве объекта исследования используется смоделированная гравитационная карта, показанная на рис. 1 как слотовая репродукция из модели глобального гравитационного поля океана [21].

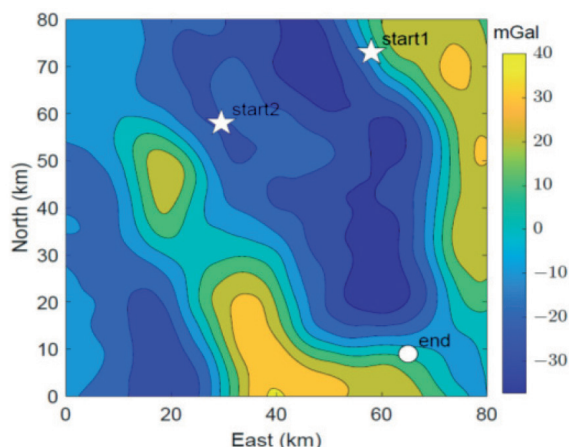


Рис. 1. Экспериментальная область смоделированной гравитационной карты океана

Причина, ввиду которой эта карта была экспериментальным образом синтезирована, заключается в том, что данный эталон картографирования обеспечивает информативность спрединга гравитационного поля выделенной в качестве примера географической области. Точность гравитационных данных выбранной экспериментальной области составляет 1,7 мГал. Максимальная гравитационная аномалия в регионе соответствует +40,8 мГал, минимальная — минус 37,2 мГал. Гравитационная аномалия содержит различные топографические особенности, такие как пики, склоны и равнины, которые оптимально подходят для анализа планирования геометрии маршрута. При фактических размерах 80 км по широте и 80 км по долготе пространственное разрешение интерполированной карты составляет в дистанции 1 км.

Выделенную географическую область удобно использовать для последующего прогнозирования в процессе планирования оптимальной траектории в дальнейшем возможном направлении исследования. Начальная точка маршрута (start1) на предполагаемом пути может быть, например, расположена в координатах (58,73 (см. рис. 1)). Путевая точка зафиксирована в пределах области подводного склона, где контурные линии распределены плотно, обеспечивая тем самым дополнительный фактор устойчивой ориентации. В качестве альтернативы можно предложить другую начальную точку (start2) в координатах (30,58 (см. рис. 1), расположенную на относительно пологом морском дне (в этом случае в исходном положении можно использовать минимум информации о гравитации). Как вариант, конечная точка маршрута (end) может находиться в координатах (65,9) для дальнейшего эксперимента по формированию безопасной маршрутизации. Следующее направление исследований планируется в эффективном нахождении набора траекторий в пределах определенного требования к погрешности, при котором мобильный объект может достичь более высокой точности позиционирования без строгого следования по определенной фиксированной траектории, тем самым повышая мобильность подводного транспортного средства, функционирующего на основе принципов оппортунистической навигации [22].

Информативные гравитационные области, показанные на рис. 2 в черно-белом варианте, учитываются как ориентиры для планирования оптимальной траектории в качестве маршрутизации в допустимой безопасной близости всплесков гравитационных аномалий с целью обеспечения эффективной ориентации [21]. Из-за неравномерного распределения гравитационного поля

характеристики согласования навигации неустойчиво меняются, когда подводные аппараты проходят через реальную морскую среду. Результаты натурных экспериментов показывают, что ориентирование по заданному направлению на фоне ландшафта информативных участков гравитационной карты может полностью обеспечивать сопоставимость графических изображений [23].

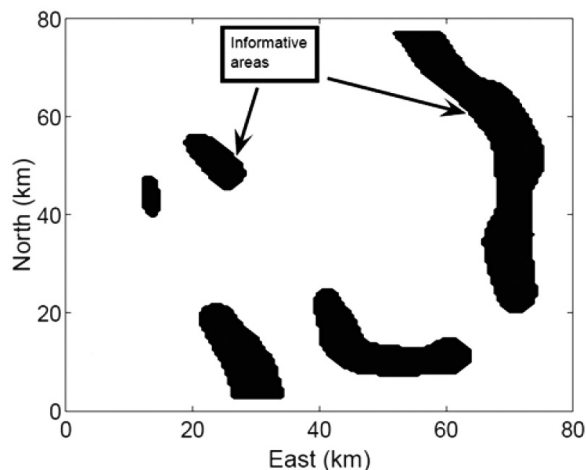


Рис. 2. Информативные участки планирования оптимальной траектории

Точность корреляции при подводной гравитационной навигации может быть увеличена на 40,39 % при использовании *итерационного метода оптимальной кольцевой точки* по сравнению с традиционным алгоритмом последовательного сопоставления контуров рельефа местности [24]. Гравиметрические измерения условно влияют на оптимальность запланированной траектории, так что фиксированная траектория может быть пройдена в рамках одной определенной морской миссии для достижения оптимальной точности навигации. Даже если реальная траектория отклоняется от запланированной на минимальную величину, имеется возможность получить высокую точность позиционирования на базе измерительной гравитационной информации. Инерциальная навигационная система с гравитационным управлением — это технология, использующая геофизическую информацию, которая имеет широкие перспективы применения, а алгоритм сопоставления гравитационной карты как ключевая процедура корреляционно-экстремальной навигации на инновационных принципах обеспечивает высокую точность позиционирования альтернативными средствами.

Предполагается, что сплайновая гравитационная модель представляет собой оптимальный картографированный эталон информативности в задаче оппортунистической навигации по аналогии с подобными вариантами корреляционно-экстремальной навигации [25]. Применение гибридной финитной модели позволяет оперативно обрабатывать избыточные массивы измерений навигационных параметров большой емкости в масштабе реального времени. При использовании математического аппарата кубических *B*-сплайнов достигается одновременно двойной эффект: повышение точности конечных результатов и организация высокоскоростных вычислений за счет оптимизации вычислительных затрат.

На основе данных проведенных вычислительных экспериментов доказана высокая точность расчетных операций до шестого порядка, т. е. шестого знака после запятой в расчете любого геофизического параметра при сплайновой компьютерной анимации навигационной изоповерхности любой степени сложности [26]. В случае восстановления навигационной изоповерхности на первый план выступают преимущества нетрадиционных для математических основ судовождения базисных сплайнов по наличию алгоритмической возможности экономии оперативной памяти бортового компьютера. Из-за конструктивной особенности базисной структуры *B*-сплайна объем хранимой навигационной информации сокращается в 4 раза по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции. Практическая применимость методов сплайн-функций в судовой

радионавигационной аппаратуре подтверждается актом о внедрении Московского конструкторского бюро «Компас» [27].

С целью демонстрации практической реализуемости сплайнового алгоритма в аспекте концепции оппортунистической навигации выполнена компьютерная визуализация картографического эталона информативности фиксированного фрагмента гравитационного поля океана согласно рис. 1 на основе гибридной *B*-сплайновой аппроксимации. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 9×9 с ключевыми данными по широте и долготе при общем количестве, равном восьми – десяти одной репродуцированной узловых точки (см. рис. 1) в соответствии с применяемой километровой координатной оцифровкой. С математической точки зрения рис. 3 является трехмерным представлением плоскостной карты поля гравитационных аномалий океана, представленной на рис. 1.

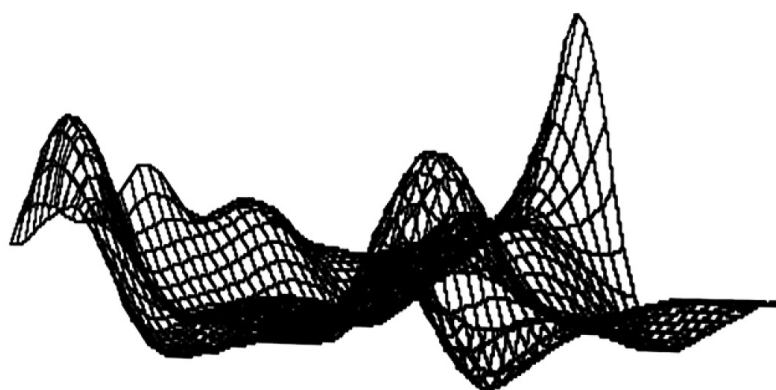


Рис. 3. Скриншот сплайн-аппроксимированной гравитационной карты

При сопоставлении рис. 1 и 3 явно определяется информационная идентичность. Тщательный анализ одного и того же изображения в разных форматах геометрической размерности подтверждает достоверность моделирования фрагмента гравитационного поля океана. Графический всплеск в средней части на отдаленной границе перспективы на рис. 3 соответствует максимуму аномалии гравитации $+40,8$ мГал в километровых координатах $(40,0)$ на нижнем плоскостном изображении (см. рис. 1). Ракурс диаметрально противоположного представления изображений в формате 2D и 3D выбран в целях лучшей наглядности перспективы трехмерного представления, так как в противном случае другие характерные участки изоповерхности будут графически неразличимы из-за затемнения на переднем плане скриншота объемной геометрической флуктуацией. Ступенчатая возвышенность с левой стороны рис. 3 синхронно соответствует кольцевым линиям максимальной оцифровки в мГал в светло-коричневых и желтых оттенках правой границы рис. 1 согласно принятой цветовой палитре.

С целью гладкого приближения продемонстрированного на рис. 3 трехмерного представления карты гравитационных аномалий использовались 30 добавочных точек по каждой координате на фрагментированном гридированном полигоне. Добавочные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов, согласно схеме Марсдена, на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала для быстрого получения каждой дополнительной реперной точки.

Геометрический фактор синтезированной изоповерхности, позволяющий осуществить центровку компьютерного изображения в случае смещения граничных участков изоповерхности за фактические размеры экрана, был задан равным безразмерному значению 110 ввиду необходимости компенсирования градации поля изменений гравитационной аномалии океана в диапазоне от $-37,2$ мГал до $+40,8$ мГал (см. рис. 1). Данный параметр обеспечивает дополнительное *математическое сглаживание* неоднородности синтезированных данных на перспективе трехмерной компьютерной визуализации.

Положительный результат моделирования, выполненного на основе фактической карты гравитационных аномалий, может быть использован в качестве достоверного эталона информативности для организации точного альтернативного позиционирования. Апробированный на методах сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу при реализации процедуры *корректируемого счисления*. Трехмерное картографирование с реализациями на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа расширяют горизонт ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации как процесса, выполняемого в сложных обстоятельствах плавания с применением элементов виртуальной реальности для возможности повышения надежности контроля местоположения за счет наглядности визуального ориентирования.

Обсуждение (Discussion)

Учитывая, что спутниковое позиционирование является движущим фактором большинства навигационных тенденций, фактически необходимо признать объективные ограничения GPS. Недостатки в работе ГНСС можно условно назвать «навигационным пробелом» («Navigation Gap»), схематично показанном на рис. 4 [28], где горизонтальная ось представляет континуум между городской / закрытой (Urban / Indoors) и сельской / открытой (Rural / Open) средой. Вертикальная ось приблизительно представляет высоту, начиная с уровня земли (Ground Level) и заканчивая космосом (Space). Устойчивая двумерная зона высокоточного надежного позиционирования условно обозначена сплошным синим цветом, но система GPS сама по себе недостаточна в смысле точности геолокации при приближении к левому нижнему углу рис. 4. Достижения в области высокочувствительного (High-sensitivity) GPS помогли уменьшить геометрический размер этого пробела в условно обозначенной на этом рисунке области фиолетовой текстурной формы. При этом все еще остается белый пробел в нижней левой части рисунка, где доступность, точность и надежность GPS сами по себе не соответствуют требованиям многих современных приложений. Альтернативный оппортунистический метод навигации может позволить восполнить условный «навигационный пробел» GPS в целях обеспечения непрерывного, точного и надежного позиционирования при любых обстоятельствах.

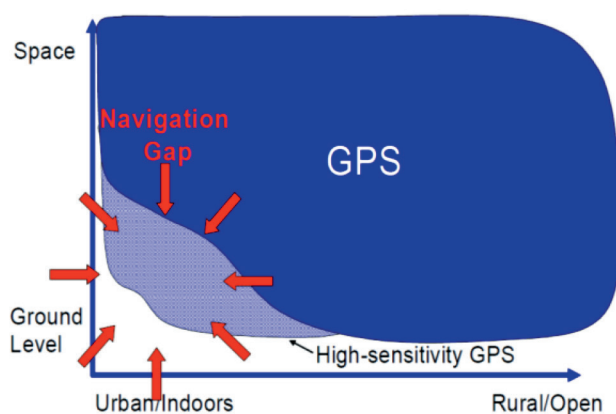


Рис. 4. Интерпретация понятия «навигационный пробел»

При использовании интегрированных сигналов объективно существует потенциал для большого разнообразия сигналов как по содержанию, так и по частоте. В зависимости от местоположения могут существовать десятки возможных для использования в целях навигации «сигналов возможностей». Источники таких сигналов могут функционировать в городских условиях, где пробел в навигации реализуется в проблемном «винтажном» виде.

Сложность практической реализации оппортунистической навигации заключается в том, что «сигналы возможностей» по оригинальному предназначению не оптимизированы для глобальной

навигации. В отличие от данных GPS, изначально передаваемых исключительно в целях позиционирования и хронометража, приложения комбинированных сигналов традиционно не разрабатывались для конкретных целей навигации. Одним из наиболее важных факторов является *атрибут времени*. Большинство наземных систем связи не синхронизированы по времени с точностью до нескольких наносекунд. Кроме того, доступность применения оппортунистической навигации зависит от географического местоположения. «Сигналы возможностей» не во всех случаях являются доступными по всему миру. Несмотря на то, что многие технические варианты оппортунистической навигации, как правило, гарантированно существуют в городских районах, точная природа этих сигналов может варьироваться в разных странах из-за различных стандартов радиовещания и связи. Также необходимо учитывать, что местоположение передатчика должно быть точно известно. Для того чтобы ориентироваться в использовании «сигналов возможностей», важно знать позиции передатчиков. Обычно относительно легко определить местоположение стационарных передатчиков. Однако если передатчики перемещаются, то они могут оказаться не столь полезными в качестве потенциального источника информации для навигации.

Внедрение комбинированной навигационной системы, основанной на стандартном базовом принципе «подключи и работай», требует дополнительного научного поиска и разработок в ключевых алгоритмах интеграции, а также в архитектуре аппаратного и программного обеспечения для эффективного конфигурирования разнородных физических датчиков с целью достижения точного и надежного позиционирования. Тем не менее указанные тактические технические сложности принципиально не препятствуют стратегическому применению оппортунистической навигации в глобальном масштабе. Помимо точного и надежного позиционирования можно получить информацию о скорости за счет технического ранжирования комбинированных сигналов. Скорость может быть практически определена путем измерения частоты или изменения фазы сигнала, если частота передачи сигнала точно фиксирована. Скорость может быть очень полезна в различных ситуациях, включая функционирование интегрированных систем, где ее можно использовать либо для ограничения дрейфа инерциальных систем как дополнительный информационный фактор, либо для реализации концепции обсервационного счисления.

В процессе инноваций навигационных технологий приходится так или иначе решать проблему «разрешения неоднозначности». В рамках проекта оппортунистической навигации становится возможным оптимальным образом справиться с указанной сложностью. В классическом варианте неоднозначность проявляется в необходимости устранения целочисленных неточностей в измерениях фазы несущей GPS для получения максимального уровня точности спутникового позиционирования. При использовании «сигналов возможностей» иногда также могут возникать неоднозначности в измерениях, основанных на разнице во времени прихода данных сигналов. Двусмысленности возникают при повторении во времени «сигналов возможностей». Очевидную неоднозначность легко исправить в процессе реализации концепции оппортунистической навигации, так как обычно существует хотя бы приблизительное представление о том, где находится приемник.

Главное, что важно понимать в процессе обработки интегрированной информации, это то, что приблизительное местоположение подвижного объекта является более точным, чем какая-либо двусмысленность. Например, в классическом судовождении данный факт, безусловно, выражен в концепции обсервационного счисления. Для ситуации аналогового телевидения было бы достаточно предположить, что навигационный потребитель находится в пределах разумного радиуса действия передающей вышки по аналогии с использованием в судовождении процедуры счисления для аналитического определения координат судна. Однако проблема более сложна в отношении других «сигналов возможностей», например, в передаче амплитудно-модулированного синусоидального несущего сигнала. Поскольку в данных в основном преобладает *несущая фиксированной частоты*, происходит значительное дублирование даже при изменяющейся амплитуде. Амплитудное радиовещание имеет длины волн приблизительно между 175–575 м, поэтому может оказаться невозможным узнать начальное положение мобильного объекта достаточно точно,

чтобы непосредственно определить ошибку неоднозначности, как в случае с телевидением. В данном случае, возможно, потребуется применение методов разрешения неоднозначности, аналогичных классически используемым в судовождении на основе близости к счислимому местоположению. В качестве поясняющей аналогии указанной проблемы оппортунистической навигации можно привести пример из классической навигации многозначности определения места судна по измеренным расстояниям до ориентиров в геометрической интерпретации пересечения в нескольких точках окружностей как изолиний дистанций.

Положительным фактором является то, что для статического стационарного радиоприемника при использовании фиксированных измерений разницы во времени прихода радиосигналов изменение геометрии траектории прохождения данных не происходит. Поэтому преимущества изменения геометрического фактора, наблюдаемые при использовании GPS из-за движущихся спутников, не будут критически сказываться в парадигме оппортунистической навигации. Перспективная схема обработки интегрированного сигнала основной полосы частот практически реализуется в течение двух этапов без необходимости получения какой-либо предварительной информации о местоположении. На первом этапе выполняется грубая оценка частоты и группировка тонов для каждого типа сигнала, на втором — дается уточненная оценка частоты на основе новой идеи когерентного объединения всех обнаруженных тонов [29].

Геолокация в закрытых помещениях в условиях высокой урбанизации оценивается как «навигационный пробел», в том смысле, что ГНСС в настоящее время надежно не функционирует и использование «сигналов возможностей» является одним из перспективных способов восполнить этот пробел в глобальной навигации. Для реализации концепции оппортунистической навигации доступно большое разнообразие сигналов, многие из которых передаются с мощностью, намного превышающей мощность GPS, что повышает способность точного позиционирования внутри зданий. Чтобы реализовать навигацию будущего обязательным условием является осуществление технического сотрудничества в области пакетной радиосвязи, восприятия, коммуникации, вычислений, хранения данных, контроля, принятия решений и обратной связи, причем необходимо эффективно содействовать развитию интегрированных сенсоров, мобильной связи 5G, интернета вещей, обработки больших объемов данных, облачных формализаций и аналогичных перспективных технологий [30]. Предлагаемый подход альтернативным образом повышает надежность позиционирования морских подвижных объектов в сложных условиях.

В морских приложениях практическое использование «сигналов возможностей» с учетом фактора «навигационного пробела» может позволить повысить стандарты безопасности судовождения за счет нивелирования локальной недееспособности ГНСС при наличии реальной возможности противодействия злоумышленному перехвату контроля управления судами.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Примеры экспериментальных данных подтверждают приблизительную корреляцию точности GPS и показателей погрешности навигации на основе комплексирования интегрирования разнородных данных. Представляется возможным последующее снижение погрешностей оппортунистической навигации за счет улучшения визуализации картографирования ландшафта «сигналов возможностей».
2. Локальная недееспособность современных спутниковых систем с позиций постулата «навигационного пробела» является мотивирующим стимулом поиска альтернативных способов местоопределения в концепции максимального интегрирования различных данных.
3. Фактор целостности определен как критерий для оценки надежности навигационной информации в системе мониторинга на основе технического оппортунизма для обеспечения позиционирования в режиме реального времени.
4. Апробирован подход B-сплайновой аппроксимации для реализации задачи одновременной геолокации и трехмерного графического отображения движения судна в трехмерном пространстве

координат с положительными результатами вычислительных экспериментов по точности и быстродействию расчетов.

5. Модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче сплайновой компьютерной анимации картографического аспекта оппортунистической навигации обеспечивает вычислительную устойчивость расчетных процедур в неафилированной с зарубежным программным обеспечением графической среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peshekhonov V. G.* High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data / V. G. Peshekhonov // *Gyroscopy and Navigation*. — 2022. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.
2. *Ююкин И. В.* Сплайновый эталон картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической ситуационной осведомленности / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.
3. *Grejner-Brzezinska D. A.* Multisensor navigation systems: A remedy for GNSS vulnerabilities? / D. A. Grejner-Brzezinska, C. K. Toth, T. Moore, J. F. Raquet, M. M. Miller, A. Kealy // *Proceedings of the IEEE*. — 2016. — Vol. 104. — Is. 6. — Pp. 1339–1353. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2528538.
4. *Merry L. A.* Comparison of Opportunistic Signals for Localisation / L. A. Merry, R. M. Faragher, S. Scheding // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2010. — Vol. 43. — Is. 16. — Pp. 109–114. DOI: 10.3182/20100906-3-IT-2019.00021.
5. *Kassas Z. M.* Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium / Z. M. Kassas, S. Kozhaya, H. Kanj, J. Saroufim, S. W. Hayek, M. Neinavaie, N. Khairallah, J. Khalife // *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. — IEEE, 2023. — Pp. 338–343. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140066.
6. *Gao Y.* Ranging technology using signals of opportunity of non-cooperative communication satellites / Y. Gao, Y. Hua, Y. Xiang, C. Huang, S. Wang, X. Zhao // *The Journal of Navigation*. — 2021. — Vol. 74. — Is. 2. — Pp. 488–500. DOI: 10.1017/S0373463320000600.
7. *Fisher K. A.* The Navigation Potential of Signals of Opportunity-Based Time Difference of Arrival Measurements: PhD Diss / K. A. Fisher. — Ohio: Wright-Patterson AFB, 2005. — 257 p.
8. *Ююкин И. В.* Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
9. *Ююкин И. В.* Оппортунистическая навигация в аспекте интеграции альтернативного позиционирования и электронного картографирования на основе сплайновой технологии / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.
10. *Morales J. J.* Event-Based Communication Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM / J. J. Morales, J. J. Khalife, Z. M. Kassas // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2023. — Vol. 59. — Is. 2. — Pp. 1624–1642. DOI: 10.1109/TAES.2022.3220722.
11. *Morales J. J.* Information Fusion Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM / J. J. Morales, J. J. Khalife, Z. M. Kassas // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2021. — Vol. 23. — Is. 8. — Pp. 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
12. *Khalife J.* Opportunistic Autonomous Integrity Monitoring for Enhanced UAV Safety / J. Khalife, M. Maaref, Z. M. Kassas // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2023. — Vol. 38. — Is. 5. — Pp. 34–44. DOI: 10.1109/MAES.2022.3178664.
13. *Gopaul N. S.* Optimal Image-Aided Inertial Navigation: PhD Diss. / N. S. Gopaul. — Toronto: York University, 2018. — 241 p.
14. *Veth M. J.* Image-Aided Navigation — Concepts and Applications / M. J. Veth, J. F. Raquet // *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. — John Wiley & Sons Inc., IEEE Press, 2020. — Vol. 2. — Pp. 1571–1595. DOI: 10.1002/9781119458555.ch50.

15. Yuyukin I. V. Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — No. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.
16. Alchinov A. I. Analysis of Stress Exposures on Autonomous Navigation Conditions in Search Correlation-Extreme Navigation Systems / A. I. Alchinov, I. N. Gorokhovskiy // Problemy Upravleniya. — 2022. — Is. 6. — Pp. 42–58. DOI: 10.25728/pu.2022.6.5.
17. Venable D. T. Large scale image aided navigation / D. T. Venable, J. F. Raquet // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2016. — Vol. 52. — Is. 6. — Pp. 2849–2860. DOI: 10.1109/TAES.2016.150603.
18. Jiang W. High-precision image aided inertial navigation with known features: observability analysis and performance evaluation / W. Jiang, L. Wang, X. Niu, Q. Zhang, H. Zhang, M. Tang, X. Hu // Sensors. — 2014. — Vol. 14. — Is. 10. — Pp. 19371–19401. DOI: 10.3390/s141019371.
19. Ююкин И. В. Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.
20. Peshekhonov V. G. Role of navigation technologies in mobile gravimeters development / V. G. Peshekhonov / V. G. Peshekhonov, A. V. Sokolov, L. K. Zheleznyak, A. D. Bereza, A. A. Krasnov // Gyroscopy and Navigation. — 2020. — Vol. 11. — Pp. 2–12. DOI: 10.1134/S2075108720010101.
21. Wang B. Path Planning Method for Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation Based on PCRB / B. Wang, T. Cai // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 993. DOI: 10.3390/jmse11050993.
22. Ююкин И. В. Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
23. Wang B. A Filtered-Marine Map-Based Matching Method for Gravity-Aided Navigation of Underwater Vehicles / B. Wang, Z. Ma, L. Huang, Z. Deng, M. Fu // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2022. — Vol. 27. — Is. 6. — Pp. 4507–4517. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3159596.
24. Zhao S. Improving Matching Accuracy of Underwater Gravity Matching Navigation Based on Iterative Optimal Annulus Point Method with a Novel Grid Topology / S. Zhao, W. Zheng, Z. Li, A. Xu, H. Zhu // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — Is. 22. — Pp. 4616. DOI: 10.3390/rs13224616.
25. 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.
26. Ююкин И. В. Применение метода сплайн-функций при компьютерной визуализации подводного рельефа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.
27. Ююкин И. В. Алгоритмизация навигационных задач на основе методов кусочных аппроксимаций: дис. ... канд. техн. наук / И. В. Ююкин. — Л., 1991. — 119 с.
28. Miller M. M. Navigation in GPS Denied Environments: Feature-Aided Inertial Systems / M. M. Miller, A. Soloviev, M. Uijt de Haag, M. Veth, J. Raquet, T. J. Klausutis, J. E. Touma // Air Force Research Laboratory. — EGLIN AFB, 2010. — Pp. 1–32. DTIC ADA581023.
29. Yang C. Starlink Doppler and Doppler Rate Estimation via Coherent Combining of Multiple Tones for Opportunistic Positioning / C. Yang, A. Soloviev // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). — IEEE, 2023. — Pp. 1143–1153. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140055.
30. Yang X. Unmanned Visual Localization Based on Satellite and Image Fusion / X. Yang // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1187. — No. 4. — Pp. 042026. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/4/042026.

REFERENCES

1. Peshekhonov, V. G. “High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data.” *Gyroscopy and Navigation* 13.1 (2022): 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.

2. Yuyukin, Igor V. "Spline standard of mapped informativeness of correlation-extreme navigation as the potential of cybernetic situational awareness." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.
3. Grejner-Brzezinska, Dorota A., Charles K. Toth, Terry Moore, John F. Raquet, Mikel M. Miller, and Allison Kealy. "Multisensor navigation systems: A remedy for GNSS vulnerabilities?." *Proceedings of the IEEE* 104.6 (2016): 1339–1353. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2528538.
4. Merry, Laura A., Ramsey M. Faragher, and Steve Scheduling. "Comparison of Opportunistic Signals for Localisation." *IFAC Proceedings Volumes* 43.16 (2010): 109–114. DOI: 10.3182/20100906-3-IT-2019.00021.
5. Kassas, Zaher M., Sharbel Kozhaya, Haitham Kanj, Joe Saroufim, Samer W. Hayek, Mohammad Neinavaie, Nadim Khairallah, and Joe Khalife. "Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium." *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2023. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140066.
6. Gao, Yuanyuan, Yu Hua, Yu Xiang, Changjiang Huang, Shanhe Wang, and Xian Zhao. "Ranging technology using signals of opportunity of non-cooperative communication satellites." *The Journal of Navigation* 74.2 (2021): 488–500. DOI: 10.1017/S0373463320000600.
7. Fisher, Kenneth A. The Navigation Potential of Signals of Opportunity-Based Time Difference of Arrival Measurements. PhD Diss. Ohio: Wright-Patterson AFB, 2005. DTIC: ADA442340.
8. Yuyukin, Igor V. "Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
9. Yuyukin, Igor V. "Opportunistic navigation applied to integration of alternative positioning and electronic mapping based on spline technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.
10. Morales, Joshua J., Joe J. Khalife, and Zaher M. Kassas. "Event-Based Communication Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 59.2 (2023): 1624–1642. DOI: 10.1109/TAES.2022.3220722.
11. Morales, Joshua J., Joe J. Khalife, and Zaher M. Kassas. "Information Fusion Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.8 (2021): 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
12. Khalife, Joe, Mahdi Maaref, and Zaher M. Kassas. "Opportunistic Autonomous Integrity Monitoring for Enhanced UAV Safety." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 38.5 (2023): 34–44. DOI: 10.1109/MAES.2022.3178664.
13. Gopaul, Nilesh S. Optimal Image-Aided Inertial Navigation. PhD Diss. Toronto: York University, 2018.
14. Veth, Michael J., and John F. Raquet. "Image-Aided Navigation — Concepts and Applications." *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Vol. 2. John Wiley & Sons Inc., IEEE Press, 2020. 1571–1595. DOI: 10.1002/9781119458555.ch50.
15. Yuyukin, I.V. "Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0102916.
16. Alchinov, Aleksandr Ivanovich, and Igor Nikolaevich Gorokhovskiy. "Analysis of stress exposures on autonomous navigation conditions in search correlation-extreme navigation systems." *Problemy Upravleniya* 6 (2022): 42–58. DOI: 10.25728/pu.2022.6.5
17. Venable, Donald T., and John F. Raquet. "Large scale image aided navigation." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 52.6 (2016): 2849–2860. DOI: 10.1109/TAES.2016.150603.
18. Jiang, Weiping, Li Wang, Xiaoji Niu, Quan Zhang, Hui Zhang, Min Tang, and Xiangyun Hu. "High-precision image aided inertial navigation with known features: observability analysis and performance evaluation." *Sensors* 14.10 (2014): 19371–19401. DOI: 10.3390/s141019371.
19. Yuyukin, Igor V. "Correlation-extreme navigation through geophysical fields based on the use of spline technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.
20. Peshekhonov, V.G., A. V. Sokolov, L. K. Zheleznyak, A. D. Bereza, and A. A. Krasnov. "Role of navigation technologies in mobile gravimeters development." *Gyroscopy and Navigation* 11 (2020): 2–12. DOI: 10.1134/S2075108720010101.
21. Wang, Bo, and Tijing Cai. "Path Planning Method for Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation Based on PCRB." *Journal of Marine Science and Engineering* 11.5 (2023): 993. DOI: 10.3390/jmse11050993.

22. Yuyukin, Igor V. "Optimal spline trajectory of the ship informative route in the map-aided navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
23. Wang, Bo, Zixuan Ma, Liu Huang, Zhihong Deng, and Mengyin Fu. "A Filtered-Marine Map-Based Matching Method for Gravity-Aided Navigation of Underwater Vehicles." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 27.6 (2022): 4507–4517. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3159596.
24. Zhao, Shijie, Wei Zheng, Zhaowei Li, Aigong Xu, and Huizhong Zhu. "Improving Matching Accuracy of Underwater Gravity Matching Navigation Based on Iterative Optimal Annulus Point Method with a Novel Grid Topology." *Remote Sensing* 13.22 (2021): 4616. DOI: 10.3390/rs13224616.
25. Yuyukin, Igor V. "Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
26. Yuyukin, Igor V. "Application of the spline-functions method in underwater relief computer visualization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.
27. Yuyukin, I. V. *Algoritmizatsiya navigatsionnykh zadach na osnove metodov kusochnykh approksimatsii*. PhD Diss. L., 1991.
28. Miller, Mikel M., Andrey Soloviev, Maarten Uijt de Haag, Michael Veth, John Raquet, Timothy J. Klausutis, and Jimmy E. Touma. "Navigation in GPS Denied Environments: Feature-Aided Inertial Systems." *Air Force Research Laboratory*. EGLIN AFB, 2010. DTIC ADA581023.
29. Yang, Chun, and Andrey Soloviev. "Starlink Doppler and Doppler Rate Estimation via Coherent Combining of Multiple Tones for Opportunistic Positioning." *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2023. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140055.
30. Yang, Xiaodan. "Unmanned Visual Localization Based on Satellite and Image Fusion." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1187. No. 4. IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1742–6596/1187/4/042026.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 11 июля 2023 г.
Received: July 11, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1015-1029

SIMULATION OF THE BARGE-TUG COMBINATIONS OPERATION USING THE MATRIX ROUTING METHOD

A. M. Zhidkova

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

The problems of modeling the operation of classic (constant configuration) and variable vessel combination of barges by matrix routing methods are discussed in the paper. Regrouping the combination directly on the route allows you to operate a larger number of barges compared to a permanent combination, which increases its load capacity. The efficiency of water transport is determined by the volume of cargo delivered in relation to operating costs, which depend on the time the vessel is on the route. Additional stops during the voyage of the vessels combination for its reformation allow to increase the total cargo turnover, but lead to an increase in the voyage time, which is a certain contradiction, the solution of which is possible through the use of a variable approach to organizing the work of barge-tug combinations. The results of the mathematical apparatus development for describing the model of the barge-tug combinations movement on inland waterways are presented; the influence of turns on the change in the combinations speed and on the total voyage time is taken into account, and a particular task of regrouping the combination is additionally considered. The route from the Nizhnesvirsky lock to Ladoga Lake, on which turning points and places, where it is necessary to change the barge-tug combinations configuration to pass it are identified, is analyzed. For the mathematical description of the vessel movement along the route, a system of calculation matrices, which allows us to generalize the change and relationship of the speed and time parameters of the vessel movement with its route, including taking into account the time of regrouping the combination, is proposed. The main factors influencing the effectiveness of the combinations operation organization with their reorganization along the route are identified. As a basis for constructing matrices, it is proposed to use turning points, the system of which is formed in the form of a three-level model. The complex of matrices allows to obtain a quantitative presentation of the vessel movement and voyage time, while providing detailed parameters for the combination passage along the individual sections of the waterway, which in general is the basis of the developed information technology for intelligent control of the barge-tug combinations operation.

Keywords: water transport, barge-tug combinations, distance matrix, speed matrix, time matrix, change in the barge-tug combinations configuration, fairway.

For citation:

Zhidkova, Anastasiya M. "Simulation of the barge-tug combinations operation using the matrix routing method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1015–1029. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1015-1029.

УДК 656.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БАРЖЕ-БУКСИРНЫХ СОСТАВОВ МЕТОДОМ МАТРИЧНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

А. М. Жидкова

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

В статье рассматриваются задачи моделирования работы классического (постоянной конфигурации) и изменяемого судового состава барж методом матричной маршрутизации. Перегруппировка состава непосредственно на маршруте позволяет оперировать большим количеством барж по сравнению с постоянным составом, что увеличивает его общую грузоподъемность. Эффективность работы водного транспорта определяется объемом доставленного груза в соотношении к эксплуатационным расходам, которые зависят от времени нахождения судна на маршруте. Дополнительные остановки во время рейса состава судов для его переформирования позволяют увеличить общий грузооборот, но при этом приводят к увеличению времени рейса, что является определенным противоречием, решение которого возможно за счет применения

вариативного подхода к организации работы барже-буксирных составов. Представлены результаты разработки математического аппарата для описания модели движения барже-буксирного состава по внутренним водным путям, с учетом влияния поворотов на изменение скорости состава и на общее время рейса, дополнительно рассматривается частная задача перегруппировки состава. В исследовании проанализирован маршрут от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера, на котором определены поворотные точки и места, где необходимо изменить конфигурацию состава для его прохождения. Для математического описания движения судна по маршруту предложена система расчетных матриц, позволяющая обобщенно представить изменение и взаимосвязи скоростных и временных параметров движения судна с его маршрутом, в том числе учесть время перегруппировки состава. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективность организации работы составов с их переформированием на маршруте. В качестве основы построения матриц предложено использовать поворотные точки, система которых сформирована в виде трехуровневой модели. Комплекс матриц позволяет получить количественное представление о движении судна и времени рейса, обеспечивая при этом детализацию параметров прохождения состава по отдельным участкам водного пути, что в целом является основой развиваемой информационной технологии интеллектуального управления работой барже-буксирных составов.

Ключевые слова: водный транспорт, барже-буксирные составы, матрица расстояний, матрица скоростей, матрица времени, изменение конфигурации состава, судовой ход.

Для цитирования:

Жидкова А. М. Моделирование работы барже-буксирных составов методом матричной маршрутизации / А. М. Жидкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1015–1029. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1015-1029.

Введение (Introduction)

Перевозка груза предполагает обязательное сочетание трех связанных элементов: грузовой базы, транспортного средства и маршрута следования. В обобщенном виде процесс перевозки представляет собой перемещение заданного груза из пункта отправления в пункт назначения с помощью различных транспортных и технических средств. В рамках данного исследования рассматривается вариант организации процесса перевозки на внутреннем водном транспорте с помощью барже-буксирных составов (ББС), при котором объем груза предварительно известен как исходный параметр или неограничен. Тогда конечной задачей является разработка технологической последовательности перемещения заданного груза. Эта задача разделяется на *выбор маршрута* и *выбор транспортного средства*. Для внутреннего водного транспорта сам маршрут не может быть изменен в силу особенности водных путей, при этом он оказывает непосредственное влияние на выбор расчетного судна, в результате чего задача сводится к оптимизации связи *груз – маршрут – расчетное судно*.

Для отдельного рейса в качестве критериев оптимальности принимается минимизация времени рейса и относимых на него затрат, что является стандартной практикой в вопросах управления транспортными системами, что подтверждается, например, работами [1]–[3]. Результат навигации в целом оценивается по показателям: объем перевозок и грузооборот, которые необходимо максимизировать. Общие эксплуатационные затраты за навигацию должны стремиться к минимуму, при этом они имеют прямую зависимость от времени и количества рейсов.

Выбор маршрута и транспортного средства оказывает непосредственное влияние на время рейса и, соответственно, на эксплуатационные затраты. Маршрут на внутреннем водном транспорте формируется по судоходным трассам, представляющим комплекс внутренних водных путей (ВВП), последовательно соединенных между собой, или отдельные речные системы и озера. Альтернативность маршрутов между двумя пунктами практически отсутствует. Этим определяются отличительные особенности внутреннего водного транспорта: линейный характер и постоянность протяженности маршрута. В то же время габариты водного пути по ширине, радиусу закругления и глубине могут существенно отличаться на его различных участках (в данном исследовании преимущественно рассматривается речной участок судоходной трассы). В связи с этим значимым фактором при выборе судна является соответствие его параметров габаритам

водного пути. Таким образом, оптимальное судно должно удовлетворять следующим требованиям: соответствовать характеристикам водного пути, перевозить заданный или максимально возможный объем груза, при этом время его перехода и эксплуатационные затраты будут стремиться к минимальным.

Длительность времени перехода определяется протяженностью судоходной трассы, наличием шлюзов (временем шлюзования), стесненных участков судового хода, поворотов и остановок в пути следования, а также скоростью движения судна по маршруту, зависящей от тактико-технических характеристик состава, нормативных ограничений и условий плавания.

Группировка отдельных несамоходных барж и буксиров позволяет сформировать составное транспортное средство (ББС). При этом поскольку характеристики водных путей на маршруте изменяются, должно быть обеспечено соответствие размеров ББС габаритам каждого из участков ВВП. За счет варьирования числа барж по линиям и рядам и их соответствующей перегруппировки во время выполнения рейса достигается увеличение общей грузоподъемности состава [4], [5]. Стесненные участки ВВП, ограничивающие возможность прохода судна как по их габаритам, так и по скорости движения, представляют собой повороты русла реки или судового хода, узкий судовый ход, ограниченный мелководьем, пролеты мостов, шлюзованные участки и т. д. Для каждого из них определяются максимальные значения габаритов судна / состава судов, обеспечивающие безопасное прохождение, которые могут существенно отличаться между собой. Перегруппировка судов на маршруте в зависимости от ширины и радиуса закругления водных путей, рассмотренная в работе [4], позволяет преодолеть стесненные участки водного пути составом большей грузоподъемности без изменения числа несамоходных барж, т. е. с сохранением объема перевозимого груза. Применение этого способа делает возможным перевозку большего количества груза за один рейс, тем самым увеличивая общий объем перевозок и грузооборот за навигацию. При этом возникает некоторое противоречие: постоянная связь грузоподъемности и общего времени рейса имеет вариативность и работает двунаправленно. Преодоление разнонаправленности этой связи, возникающее для одного рейса, может произойти при выполнении условия, когда для перевозки одинакового объема груза общее время рейсов с перегруппировкой меньше общего времени рейсов без перегруппировки.

Решение данной задачи позволит выработать план грузовых отправок, адаптированный под заданные параметры объема перевозимого груза и флота, а в качестве метода для решений поставленной задачи предлагается критериальный перебор вариантов с целью определения наиболее оптимального. Это создает вариативный подход к оптимизации перевозок грузов ББС. Изменение конфигурации ББС на маршруте следования позволяет составу пройти стесненные участки ВВП с сохранением первоначального объема груза, однако время нахождения состава в пути увеличивается. Положительное влияние заключается в увеличении перевозимого за один рейс груза или, при ограниченном объеме груза, в сокращении числа рейсов. Отрицательным влиянием является увеличение времени отдельного рейса за счет дополнительных остановок в пути следования, необходимых для перегруппировки состава.

Целью исследования, решаемого в рамках цикла научных статей, является разработка математического аппарата для описания модели движения ББС по ВВП, частной задачей данной статьи является определение влияния поворотных участков водного пути на изменение скорости движения переменного по конфигурации ББС по маршруту следования и времени рейса.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассматривается участок пути от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера. Каждая точка линии маршрута имеет свои географические координаты. Для решения поставленной задачи используются классические основы теории транспортных процессов, описывающие движение одиночного транспортного средства во взаимодействии с окружающей средой. Новым в данной работе является учет особенностей, присущих исключительно водному транспорту, а именно

линейность маршрута. Дополнительно учитываются такие факторы, как изменение скорости движения на поворотных участках, в узкостях акватории и при искусственных ограничениях водного пути. Таким образом, новая задача может быть решена за счет построения матриц расстояний, матриц скоростей, зависимых матриц времени, а также учета дополнительных факторов, раскрывающих технологические особенности изменения конфигурации ББС на маршруте следования.

Интегральное решение данной задачи является весьма затруднительным, поскольку в расчетах необходимо учесть большое число неизвестных факторов и выполнить вариантную проработку, исходя при этом из вариантов структуры ББС. Количество необходимых частных выборов может достигать сотни независимых решений. В работе в качестве основного метода предлагается выполнить анализ возможности прохождения составом судов заданного маршрута, в частности поворотов судового хода, и определить изменение скоростных и временных параметров, возникающее вследствие его перегруппировки в период совершения рейса.

Маршруты от пункта отправления до пункта назначения задаются множеством координатных путевых точек. Расчетный участок водного пути разделен на отдельные прямолинейные участки. Тогда наиболее важным вопросом в логической цепочке расчетов является учет поворотных участков на маршруте следования, оказывающих наибольшее влияние на скоростной режим движения состава и его конфигурацию. Для математической формализации расчетов предлагается следующая модель судового хода: прямолинейные участки описываются двумя последовательными путевыми точками; точки, ограничивающие этот участок, обозначаются как поворотные; вводится ограничение на любые маневры ББС; криволинейные участки описываются последовательным набором путевых точек, находящихся на минимальном расстоянии друг от друга; каждая из точек соответствует заданному маневру (повороту) ББС; в качестве поворотных здесь обозначаются точки, в которых фактор поворота имеет весомое значение относительно проходимого расстояния. Степень декомпозиции криволинейных участков маршрута определяется необходимой точностью расчетов и составляет, как правило, от одного до десяти. Градация может варьироваться в зависимости от длины ББС и его радиуса поворота.

В качестве исходных данных для анализа влияния стесненных участков, в том числе поворотов водного пути, на движение ББС выделяют поворотные точки (такие, в которых происходит маневр ББС). Разработана новая структура построения матриц, в которой из общего массива путевых точек учитываются только поворотные, что существенно сокращает размерность матрицы, выделяя стесненные участки маршрута. Для математического описания поворотных точек предлагается использовать следующие параметры: угол поворота, радиус закругления, ширина маневровой полосы. Всего на исследуемом участке пути было выделено 228 поворотных точек судового хода, которые обозначены f_i . В работе использован каталог координат из навигационной карты. Полученные координатные точки нанесены на электронную карту и соединены в маршрутную линию (рис. 1) с использованием геоинформационной системы QGIS.

Судно при прохождении маршрута осуществляет маневренные повороты, причины и характер которых различаются условиями: основная группа — это маневрирование, связанное с естественным судовым ходом и техническими сооружениями, дополнительная группа — маневрирование, связанное с расхождением судов, препятствий и т. п. В данном исследовании рассматривается только основная группа маневров, поскольку она имеет постоянный характер. Расчеты велись в матричной форме с применением программного обеспечения Microsoft Excel и собственного программного обеспечения в Jupyter Notebook с применением библиотек Pandas, NumPy, Matplotlib.

Расстояние между поворотными точками принимается как неизменное (при условии следования судна (состава) по линии судового хода). Время прохождения участков водного пути зависит от скорости движения судна (состава) по каждому из входящих в него участков, т. е. от характеристик прямолинейных и криволинейных участков (поворотов судового хода). Каждая поворотная точка маршрута находится на определенном расстоянии относительно других точек, последовательность которых является неизменной. Для определения и анализа их взаимного расположения строится

матрица расстояний (M_s). В целях данной статьи в качестве элементов матрицы будем записывать расстояния между поворотами судового хода на маршруте следования.



Рис. 1. Участок пути от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера

Матрица расстояний представляет собой симметричную квадратную матрицу, элементы которой содержат расстояния между объектами в метрическом пространстве, а главная диагональ состоит из нулей, поскольку отражает расстояние от объекта до самого себя. Элементы матрицы расстояний (s) — расстояния между поворотными точками судового хода (f_i). Порядок матрицы равен числу выделенных точек, обозначающих поворот судового хода. Каждый элемент матрицы имеет индекс, содержащий порядковый номер строки m и столбца n . Матрица расстояний — квадратная матрица, т. е. $m = n$. Число строк m и число столбцов n определяются числом поворотов судового хода. Тогда $m = n = f$. В целом матрица расстояний характеризует взаимное расположение выделенных поворотных точек, исчисляемое в заданных единицах измерения:

$$M_s = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ s_{m1} & \cdots & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & s_{1f} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ s_{f1} & \cdots & 0 \end{pmatrix}.$$

Судно (состав) проходит маршрут с определенной скоростью движения, которая, как правило, отличается в зависимости от судоходных условий на участке водного пути. На скорость движения оказывают влияние следующие факторы: габариты судового хода, скорость и направление течения, сила и направление ветра, наличие в непосредственной близости встречных, попутных или пришвартованных судов. При этом скорость движения на прямолинейных участках при прочих равных условиях выше, чем на криволинейных участках. Выбор скоростного режима определяется с учетом тактико-технических характеристик судна (состава), закрепленных нормативно требований и практики судовождения. Изменение скорости на различных участках предлагается отразить с помощью матрицы скоростей.

Матрица скоростей (M_v) — это матрица-столбец (определяется линейным характером движения судна по маршруту водного пути), каждый элемент которой соответствует расчетной

скорости на участках водного пути (на участках между поворотами судового хода на маршруте следования: f_i и $f_{(i+1)}$, где i — порядковый номер выделенных поворотных точек). Элементы матрицы характеризуют скорость состава между двумя последовательно расположенными поворотными точками, поэтому число строк в общем случае будет соответствовать числу выделенных поворотных точек, уменьшенному на единицу, т. е. $m = f - 1$. В целях выполнения расчетов в матричной форме матрица скоростей приведена к размерности матрицы расстояний, что в дальнейшем позволило выполнять расчеты с диагональными матрицами:

$$M_v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{f-1} \end{pmatrix} \leftrightarrow M_v = \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_{f-1} \end{pmatrix}.$$

Определение расчетной скорости может выполняться с применением двух основных вариантных подходов. По первому варианту скорость судна (состава) принимается в зависимости от его тактико-технических характеристик, указанных в паспорте судна (судов состава) с учетом нормативно закрепленных ограничений, действующих на внутренних водных путях. Преимуществами при этом являются простота проведения расчетов для каждого отдельного судна (состава), а также снижение трудоемкости за счет отсутствия необходимости выполнять натурные эксперименты и анализировать практические данные по движению судов. Однако в данном случае снижается точность расчетов, поскольку не производится учет реальных условий судоходства с точки зрения управляемости и маневренных характеристик судна (состава); поправка по условиям плавания определяется теоретическим способом. Наиболее существенное влияние это обстоятельство оказывает на расчеты скорости движения судна на криволинейных участках, снижая их точность. Второй вариант — использование фактических данных о движении судов — позволяет уменьшить этот недостаток и обеспечить более точное моделирование поведения судна на каждом отдельном участке водного пути. Данные можно получить с помощью систем удаленного мониторинга судов Автоматической идентификационной системы. В предварительных расчетах может использоваться максимальная скорость из паспорта судна с корректировкой на ограничения по Правилам плавания судов по внутренним водным путям. Тем не менее при более детальном построении работы состава за основу принимается вариант, в котором используются фактические данные о скоростных режимах движения судов как наиболее приближенные к реальным условиям.

Время прохождения судном (составом судов) маршрута и его отдельных участков предметно отражается с помощью построения матрицы времени, которая характеризует влияние изменения скорости судна (состава судов), в том числе на криволинейных участках, на время рейса, а также позволяет показать время, в течение которого судно (состав судов) проходит поворот. Матрица времени (M_t) рассчитывается делением матрицы расстояний на преобразованную матрицу скоростей. Элементы матрицы времени (t) характеризуют время, необходимое составу для прохождения участка водного пути между двумя поворотными точками. По своей структуре матрица расстояний и матрица времени совпадают:

$$M_t = \frac{M_s}{M_v} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & t_{1f} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ t_{f1} & \cdots & 0 \end{pmatrix}.$$

В рамках данной статьи отдельно рассматривается возможность прохождения составом поворотов, определяемая требованиями к скорости и габаритам состава судов. При прочих равных условиях криволинейные участки маршрута предполагают более строгие ограничения по скорости движения и габаритным характеристикам судов (составов судов) по длине и ширине, чем

прямолинейные участки. Снижение скорости, необходимое для совершения маневра, отражается в матрицах скоростей и времени. Возможность прохождения криволинейного участка по радиусу поворота и ширине зависит от характеристик судна (состава судов) и в общем случае имеет альтернативный характер («проходит» – «не проходит»). В статье [4] приведены положения, создающие предпосылки для преодоления линейного подхода, используемого в настоящее время в практике эксплуатации барже-буксирных составов. Предлагается изменять конфигурацию состава на оптимальную для каждого из участков маршрута ВВП в зависимости от их характеристик. Определить способность прохождения состава по участку водного пути и выявить тот, в котором предполагается применить перегруппировку, можно на основе соотношений из [4], [5].

В качестве примера выполнения такого расчета на маршруте от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера рассмотрим повороты на участках 1144–1146 км (70 м, 700 м) и 1157–1158 км (85 м, 600 м) реки Свирь (в скобках, соответственно, приведены гарантированная ширина и гарантированный радиус¹). Координаты основных поворотных точек: на участке 1144–1146 км: 60.547822, 33.109341; 60.545248, 33.115799; 60.542265, 33.117282; 60.540777, 33.118023; 60.536057, 33.115342; на участке 1157–1158 км: 60.491621, 32.938561; 60.489382, 32.935963; 60.488533, 32.932797. Габариты барж прием на основе анализа, приведенного в статье [6], по результатам которого выявлено три группы барж, зарегистрированных в регистрационной книге Российского Классификационного Общества, с преобладающими значениями длины и ширины. В качестве расчетных прием наибольшие габариты из диапазона первой группы: 37,9 м и 8 м по длине и ширине соответственно. Размеры буксира условно составляют 24 м и 7,2 м. Логическая последовательность расчетов и формулы приведены в табл. 1. Перегруппировка обеспечивает составу проходимость по участкам водных путей с различными габаритными характеристиками при максимальном их использовании без изменения числа барж.

Таблица 1

**Логическая последовательность и пример расчета количества барж
в судовом составе, его размеров по длине и ширине**

Наименование	Участок 1144–1146 км р. Свирь	Участок 1157–1158 км р. Свирь
Габаритная ширина, м	70,0	85,0
Габаритный радиус, м	700,0	600,0
Формула для определения максимальной длины барже-буксирного состава (для гибкой сцепки)	$l_{TN} = l_u + l_o + l_n j \leq \frac{R}{3},$ где l_{TN} — длина ББС; l_u — длина буксира-толкача; l_o — длина буксира-тягача; l_n — длина баржи; j — количество рядов в составе; R — радиус поворота участка водного пути	
Максимальная длина барже-буксирного состава, м	233,(3)	200,0
Формула для определения максимальной ширины барже-буксирного состава	$w_{TN} = (w_u \vee w_o \vee w_n \cdot i) \rightarrow \max \leq W(D, d_{TN}),$ где w_{TN} — ширина ББС; w_u — ширина буксира-толкача; w_o — ширина буксира-тягача; w_n — ширина баржи; i — количество линий в составе; W — ширина участка водного пути; D — глубина участка водного пути; d_{TN} — осадка ББС	

¹ Распоряжение Росморречфлота от 29.12.2022 № ЗД-496-р «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2023 года».

Окончание табл. 1

Максимальная ширина ББС, м	70,0	85,0
Длина буксира, м	24,0	
Ширина буксира, м	7,2	
Количество буксиров в составе, ед.	2 (расположены в один ряд)	
Длина баржи, м	37,9	
Ширина баржи, м	8,0	
Максимально возможное число барж в линии, ед.	5	4
Максимально возможное число барж в ряду, ед.	8	10
Количество барж в составе, ед.	40	40
Длина состава при группировке, м	213,5	175,6
Ширина состава при группировке, м	64,0	80,0
Проверка по длине	$213,5 \leq 233,(3)$	$175,6 \leq 200,0$
Проверка по ширине	$64,0 \leq 70,0$	$80,0 \leq 85,0$

Схемы прохождения составом поворотов приведены на рис. 2. ББС обозначен зеленым цветом на участках водного пути при соответствии его размеров габаритам судового хода, красным цветом — на участках, которые ББС не может пройти без изменения конфигурации.

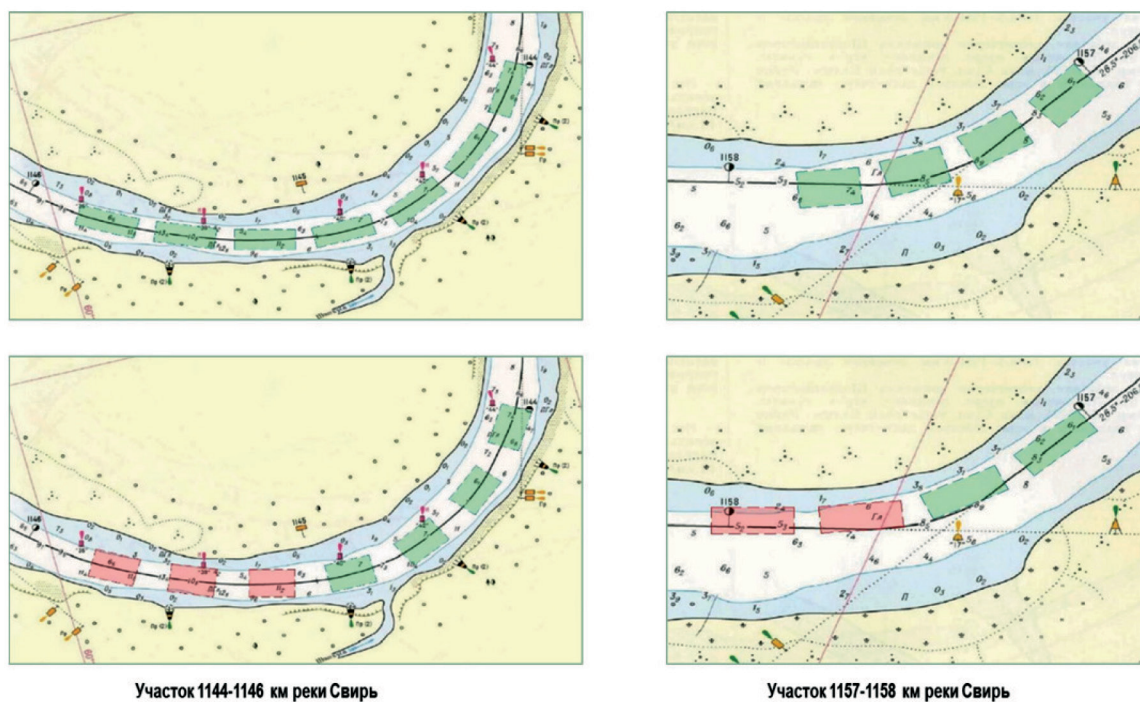


Рис. 2. Схемы прохождения поворотов ББС при различных конфигурациях на участках 1144–1146 км и 1157–1158 км р. Свирь

Для отображения дополнительного времени, необходимого для переформирования состава, предлагается составить матрицу перегруппировки. Ее построение предполагает предварительное определение участков маршрута, преодоление которых невозможно без изменения размеров ББС по длине и ширине. Основная задача данной матрицы — дать комплексное и емкое представление

о числе и расположении поворотных точек на маршруте, для прохождения которых нужно изменить конфигурацию ББС и отразить время, необходимое для перегруппировки состава.

Матрица перегруппировки (M_{re}) в качестве элементов (t_{re}) включает время перестановки барж и буксиров в составе по линиям и рядам, в результате которой обеспечивается прохождение составом стесненного участка водного пути (в данной работе в качестве таких участков рассматриваются преимущественно повороты судового хода). Элемент будет иметь нулевое значение ($t_{re} = 0$) при отсутствии необходимости осуществлять перегруппировку для следования по соответствующему отрезку маршрута. Главная диагональ состоит из нулевых элементов, так как характеризует время перемещения от точки до этой же точки. Порядок матрицы перегруппировки совпадает с порядком матриц времени и расстояний:

$$M_{re} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & t_{relf} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ t_{ref1} & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица перегруппировки является составной частью интегрального результата, получаемого на основе уточнения исходных матриц времени и скоростей за счет учета остановок в пути следования, необходимых для переформирования состава. Интегральным результатом становятся уточненная матрица времени (M'_t) и уточненная матрица скоростей (M'_v). Данные матрицы представляют собой соответственно матрицы времени и скоростей, откорректированные с учетом выполнения составом перегруппировки на маршруте. На основе данного математического аппарата выполнены варианты расчета движения состава по участку маршрута от Нижнесвицкого шлюза до Ладожского озера. Сформированная группа матриц является базой для определения влияния стесненных участков водного пути, в том числе поворотов судового хода, на изменение скорости движения ББС и времени рейса, представляя собой инструмент для анализа эффективности перегруппировки в пути следования в зависимости от маршрута и габаритных параметров состава.

Результаты (Results)

Интегральный результат исследования представлен в двух связанных вариантах: уточненной матрицей времени и уточненной матрицей скоростей. Возникает следующая взаимосвязь матриц: на начальном этапе анализа матрицы расстояний и скоростей составляют основу для построения матрицы времени, матрица перегруппировки выступает независимой матрицей. Определить влияние поворотов на время перехода по маршруту и скорость состава судов можно за счет интеграции матрицы перегруппировки и матриц времени и скоростей соответственно. При этом построение уточненной матрицы скоростей базируется на уточненной матрице времени и матрице расстояний. Полученные матрицы будут являться результирующими, так как они демонстрируют влияние поворотных точек судового хода на скорость состава и его время нахождения на маршруте.

Построение матриц позволяет визуальным образом представить расположение и влияние поворотных точек на прохождение судном маршрута. Математический аппарат расчетных матриц формирует как обобщенное представление о времени, скорости и расстоянии на маршруте, так и детализирует движение судна по заданным участкам водного пути. В процессе выполнения поворота скорость состава уменьшается, при этом ряд криволинейных участков невозможно преодолеть составом определенной конфигурации, необходимо его переформирование. Перегруппировка состава необходима для тех криволинейных участков маршрута, которые состав судов не имеет возможности преодолеть без изменения своих размеров по длине и ширине (ряд участков состав может преодолевать без изменения конфигурации).

В качестве результата получена база для оценки целесообразности осуществления переформирования ББС отдельно для каждого маршрута. Матрица перегруппировки, формирующаяся

по результатам анализа стесненных участков водного пути, в том числе поворотных точек, отражает участки маршрута, для прохождения которых составу необходимо изменить конфигурацию. Она представляет собой инструмент, комплексно показывающий число и расположение мест переформирования состава на маршруте относительно параметров судов и характеристик ВВП. Другим назначением матрицы перегруппировки является уточнение интегрального результата, получаемого на основе взаимодействия всех матриц.

В целях разработки полного комплекса матриц (масштабного вычислительного эксперимента) выполнен анализ поворотных точек судового пути, в ходе которого они рассмотрены с позиции возможного влияния на состав. Так, в укрупненном виде они подразделяются на три типа, создавая трехуровневую модель. Отдельно выделен метауровень, в который входят поворотные точки, где изменение скоростного режима и конфигурации состава не предполагается. Уровни модели имеют следующее описание:

1-й уровень — включает поворотные точки ВВП, требующие учета изменения скоростного режима движения судов;

2-й уровень — содержит поворотные точки ВВП, требующие переформирования ББС;

3-й уровень — составляют поворотные точки ВВП, требующие смены расположения в составе или изменения назначения буксиров, в том числе замены толкачей на тягачи.

Уровень более высокого порядка включает характеристики предыдущих уровней. Поворотные точки второго и третьего уровней являются местами переформирования ББС. При этом одна и та же точка для составов с разными габаритными (длина, ширина, осадка) и маневренными характеристиками может относиться к различному уровню.

На рассматриваемом участке пути маршрута следования характерные поворотные точки (повороты судового хода) были выявлены расчетным способом, в том числе по ранее предложенным методикам [4], [5]. Поворотные точки являются основой для предлагаемого комплекса матриц. Приведем пример построения расчетных матриц для маршрута ББС на участке Волго-Балтийского бассейна от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера. Расчет матрицы расстояний выполнен в геоинформационной системе QGIS с помощью инструмента анализа «Матрица расстояний», определены взаимные расстояния для каждой выделенной точки маршрута в виде базовой характеристики маршрута, служащей основой для планирования движения состава. Предполагается, что ББС движется по линии судового хода, поэтому расстояния между участками принимаются в качестве неизменных. Фрагмент матрицы расстояний приведен на рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1,02	1,36	1,72	1,98	2,41	3,10	3,38	3,64	4,54	4,79	4,94	5,02	5,05	5,17
2	1,02	0	0,34	0,70	0,96	1,45	2,20	2,48	2,72	3,56	3,81	3,95	4,02	4,03	4,16
3	1,36	0,34	0	0,36	0,64	1,18	1,96	2,23	2,46	3,27	3,50	3,63	3,70	3,69	3,82
4	1,72	0,70	0,36	0	0,28	0,88	1,66	1,94	2,15	2,92	3,15	3,27	3,34	3,33	3,48
5	1,98	0,96	0,64	0,28	0	0,63	1,41	1,68	1,88	2,64	2,87	2,99	3,06	3,09	3,25
6	2,41	1,45	1,18	0,88	0,63	0	0,78	1,06	1,28	2,13	2,39	2,54	2,65	2,84	3,10
7	3,10	2,20	1,96	1,66	1,41	0,78	0	0,28	0,54	1,51	1,81	2,01	2,17	2,60	2,97
8	3,38	2,48	2,23	1,94	1,68	1,06	0,28	0	0,27	1,29	1,60	1,81	1,98	2,49	2,91
9	3,64	2,72	2,46	2,15	1,88	1,28	0,54	0,27	0	1,02	1,34	1,55	1,73	2,30	2,74
10	4,54	3,56	3,27	2,92	2,64	2,13	1,51	1,29	1,02	0	0,32	0,55	0,76	1,55	2,07
11	4,79	3,81	3,50	3,15	2,87	2,39	1,81	1,60	1,34	0,32	0	0,23	0,47	1,34	1,87
12	4,94	3,95	3,63	3,27	2,99	2,54	2,01	1,81	1,55	0,55	0,23	0	0,24	1,15	1,69
13	5,02	4,02	3,70	3,34	3,06	2,65	2,17	1,98	1,73	0,76	0,47	0,24	0	0,93	1,46
14	5,05	4,03	3,69	3,33	3,09	2,84	2,60	2,49	2,30	1,55	1,34	1,15	0,93	0	0,53
15	5,17	4,16	3,82	3,48	3,25	3,10	2,97	2,91	2,74	2,07	1,87	1,69	1,46	0,53	0

главная диагональ

Рис. 3. Фрагмент матрицы расстояний, км

Скорость в общем случае ограничена тактико-техническими характеристиками судна (состава судов) и Правилами движения и стоянки судов в бассейнах ВВП с учетом требований

Правил плавания судов по внутренним водным путям. Для составления матрицы скоростей в начальном варианте принято, что скорость судна на всех участках водного пути соответствует тактико-техническим характеристикам состава с поправкой в 30 %. В дальнейшем будут применяться поправки к скорости исходя из угла поворота судового хода. В качестве расчетной принята скорость свободного хода буксира-толкача проекта 908 (20,40 км/ч), уменьшенная на 30 %, что составляет 14,28 км/ч. Основное назначение матрицы скоростей в рамках данных расчетов — показать динамику прохождения составом судов различных участков водных путей. Поскольку в качестве расчетной принята теоретическая скорость движения состава, матрица скоростей в рамках этой статьи не приводится.

Матрица времени характеризует время прохождения составом маршрута при условии соответствия его размерений габаритам каждого из участков водного пути, на котором выполняется рейс, она строится на основе матриц расстояний и скоростей. Фрагмент такой матрицы приведен на рис. 4.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17	0,22	0,24	0,25	0,32	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36
2	0,07	0	0,02	0,05	0,07	0,10	0,15	0,17	0,19	0,25	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29
3	0,10	0,02	0	0,03	0,04	0,08	0,14	0,16	0,17	0,23	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27
4	0,12	0,05	0,03	0	0,02	0,06	0,12	0,14	0,15	0,20	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24
5	0,14	0,07	0,04	0,02	0	0,04	0,10	0,12	0,13	0,18	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23
6	0,17	0,10	0,08	0,06	0,04	0	0,05	0,07	0,09	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,22
7	0,22	0,15	0,14	0,12	0,10	0,05	0	0,02	0,04	0,11	0,13	0,14	0,15	0,18	0,21
8	0,24	0,17	0,16	0,14	0,12	0,07	0,02	0	0,02	0,09	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20
9	0,25	0,19	0,17	0,15	0,13	0,09	0,04	0,02	0	0,07	0,09	0,11	0,12	0,16	0,19
10	0,32	0,25	0,23	0,20	0,18	0,15	0,11	0,09	0,07	0	0,02	0,04	0,05	0,11	0,14
11	0,34	0,27	0,25	0,22	0,20	0,17	0,13	0,11	0,09	0,02	0	0,02	0,03	0,09	0,13
12	0,35	0,28	0,25	0,23	0,21	0,18	0,14	0,13	0,11	0,04	0,02	0	0,02	0,08	0,12
13	0,35	0,28	0,26	0,23	0,21	0,19	0,15	0,14	0,12	0,05	0,03	0,02	0	0,07	0,10
14	0,35	0,28	0,26	0,23	0,22	0,20	0,18	0,17	0,16	0,11	0,09	0,08	0,07	0	0,04
15	0,36	0,29	0,27	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,14	0,13	0,12	0,10	0,04	0
	главная диагональ														

главная диагональ

Рис. 4. Фрагмент матрицы времени, ч

В построении матрицы перегруппировки использованы данные о поворотных точках. В данной статье матрица перегруппировки моделируется для обозначения влияния криволинейных участков водного пути на время перехода состава по маршруту. В практических расчетах используются соотношения из [4], [5], реализуемые с помощью программных средств для определения необходимости перегруппировки состава выбранной конфигурации на маршруте в целях его прохождения. На основе фактических данных известно, что на переформирование состава необходимо не менее 15 мин. При этом на практике требуемое время может существенно различаться в зависимости от количества модулей, подлежащих переформированию, и типа сцепных устройств, что оказывает существенное влияние на общее время рейса и обоснованность перегруппировки составов на маршруте. Остановка для изменения конфигурации состава учитывается в период времени прохождения им участка, следующего за переформированием. Скорость во время перегруппировки принимается равной нулю, что снижает значение средней скорости прохождения участка, на котором требуется переформирование состава. Фрагмент матрицы перегруппировки дан на рис. 5.

На фрагментах полученных матриц расстояний, времени и перегруппировки цветом обозначена главная диагональ, на фрагменте матрицы перегруппировки цветом также обозначены участки, перед прохождением которых необходимо осуществить переформирование для их преодоления с имеющимся числом барж и буксиров. Описанные матрицы расстояний, скоростей, времени и перегруппировки являются базовыми для составления

уточненных матриц времени и скоростей, выступающих в качестве результирующих. Они показывают время и динамику прохождения составом маршрута при условии изменения его конфигурации в процессе выполнения рейса.

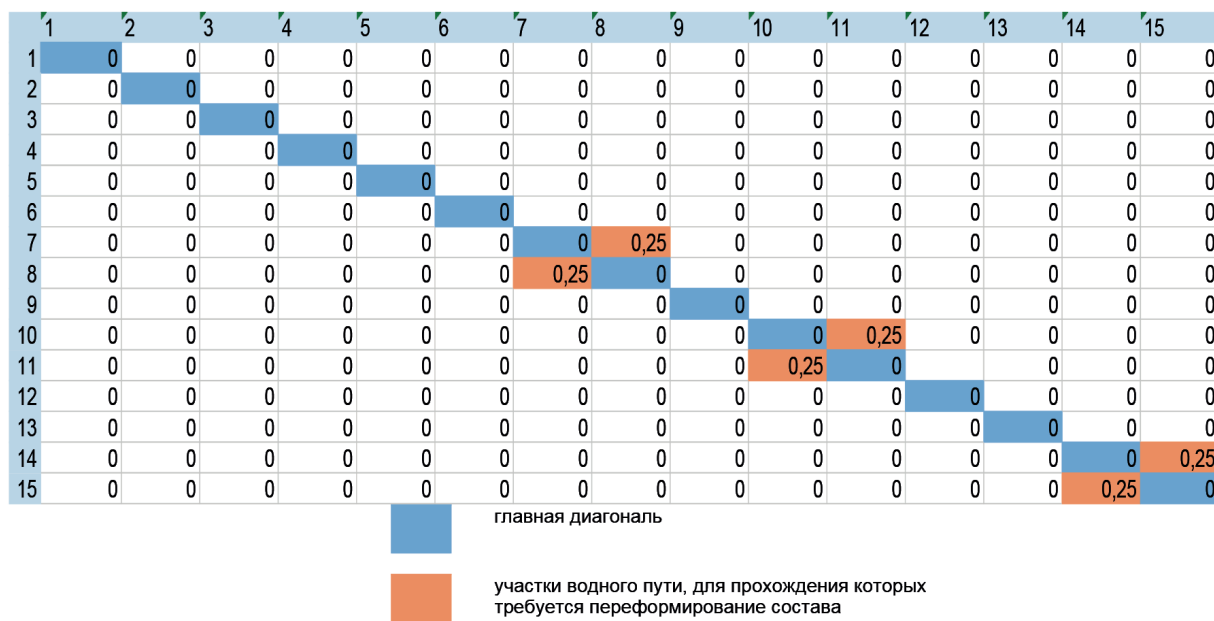


Рис. 5. Фрагмент матрицы перегруппировки, ч

Вариативность стыковки состава во многом определяет целесообразность организации работы ББС с переформированием на ВВП непосредственно во время рейса. Существенным фактором, влияющим на время перегруппировки состава и, соответственно, на эффективность рейса, является способ переформирования состава и тип сцепного устройства. Использование автоматических сцепных устройств создает преимущество по времени и объему проектного груза. При применении для стыковки составных частей ББС полуавтоматических сцепных устройств преимущество по времени в значительной степени снижается или отсутствует, при этом преимущество по проектному грузу сохраняется. Для определения эффективности по времени необходим дополнительный расчет, учитывающий зависимость от длины маршрута, количества модулей, изменяющих положение в составе, и числа участков, требующих перегруппировки. Механические сцепные устройства, предполагающие ручное переформирование, полностью нивелируют преимущества, создаваемые перевозкой большего объема проектного груза за один рейс. При ограниченном числе буксиров в составе этот вариант также может повлечь дополнительные расходы на привлечение дежурных удерживающих буксиров.

Основу определения эффективности рейса составляют объем перевезенного груза и время нахождения судна на маршруте. При одинаковом расстоянии и скорости движения время на перегруппировку состава увеличивает продолжительность рейса, однако это позволяет составу полностью преодолеть маршрут с большим объемом перевозимого груза. Важно понимать, что возможные конфигурации состава по-прежнему находятся в зависимости от «узких мест» маршрута, но тем не менее объем перевозки за один рейс может быть сравнительно увеличен.

Среди факторов, влияющих на целесообразность организации работы ББС с их перегруппировкой на маршруте, можно выделить следующие:

- число мест, в которых необходимо произвести перегруппировку состава относительно протяженности маршрута;
- значение прироста объема перевезенного груза за один рейс;
- используемый тип сцепного устройства.

Обсуждение (Discussion)

Вопросы маневрирования составов судов в стесненных условиях в научной литературе рассматриваются с различных позиций. Так, в статьях [7], [8] исследуется изменение курса судна: в [7] описывается прибор, предназначенный для измерения угловой скорости поворота судна относительно одной из его осей, в [8] приводятся результаты эксперимента по выполнению маневров поворота на заданный курс (угол), определяющие значение скорости перекадки руля и скорости судна во время выполнения поворота. В статье [9] предлагается статистическая модель для анализа и расчета количественных показателей управляемости судна, приведен пример анализа влияния случайных параметров для судна типа «Волго-Балт», авторы которой в качестве критерия безопасности при маневренных операциях, включая прохождение узкостей, предлагают использовать величину риска. В [10] в процессе рассмотрения вопроса маневренных качеств судов в стесненных условиях плавания автором статьи приводятся наглядные примеры, показывающие, что радиус циркуляции кормовой оконечности не может в полной мере характеризовать геометрические параметры циркуляции судна в условиях стесненной акватории, а также отмечается влияние формы корпуса судна на величину максимального радиуса циркуляции оконечности судна и влияние наличия дифферента на изменение ходовой полосы при прохождении криволинейных участков водного пути. Выявлено, что исследования, связывающие маневры состава судов с параметрами водного пути, практически отсутствуют, данные объекты в большинстве случаев рассматриваются отдельно или в качестве ограничительного фактора.

В рамках данной статьи предлагается при прохождении поворотов ББС осуществлять их перегруппировку для наиболее полного использования имеющихся габаритов ВВП. Это возможно за счет того, что состав формируется из отдельных буксиров и барж, от перестановки которых по линиям и рядам зависят общая длина и общая ширина судового состава. В качестве одного из инструментов анализа эффективности такой перегруппировки на маршруте предлагаются приведенные по тексту статьи численные методы с использованием матриц.

Существенной составляющей в процессе реформирования является тип сцепного устройства, поскольку он может оказать определяющее влияние на время, необходимое на перестановку барж и буксиров в составе и, соответственно, на время рейса в целом. Сцепные устройства подробно описываются в статьях различных авторов, например, в [11], где раскрываются основные преимущества и недостатки существующих сцепов, анализируются их характеристики. В качестве рекомендации в указанной ранее статье для судов *река – море*, эксплуатирующихся преимущественно для речных переходов, предлагается использовать сцепные устройства типа «О» или «УДО» в совокупности со стальными тросами, рассчитанными на соответствующие нагрузки. В статье [12] отдельное внимание уделяется автоматическим сцепным устройствам, отмечается многообразие и сложность их конструкций, а также высокий средний возраст.

Для реализации перегруппировки ББС непосредственно на маршруте следования применение автоматических сцепных устройств представляется наиболее эффективным. Данный тип устройств позволяет сократить время стыковочного процесса за счет отсутствия ручных операций, т. е. время, необходимое для остановки на перемещение буксиров и барж, уменьшается, в результате чего максимизируются преимущества, создаваемые реформированием состава.

Заключение (Conclusion)

Перегруппировка ББС позволяет увеличить объем перевозимого за один рейс груза, что приводит к дополнительным остановкам на пути следования, увеличивающим время рейса. Анализ распределения времени, необходимого для прохождения маршрута, в том числе при преодолении криволинейных участков водного пути, и скорости движения судна становится одним из элементов определения целесообразности изменения конфигурации состава в пути следования. В настоящей статье предложен комплекс математических инструментов для оценки влияния поворотов водного пути на скорость движения судна при их прохождении и время рейса, в том числе при перегруппировке состава.

В ходе исследования при решении поставленной задачи достигнуты следующие результаты.

1. Сформулированы математические основы для расчетов в матричной форме изменения времени и скорости при движении ББС по маршруту, в том числе вследствие изменения его конфигурации.
2. Предложена трехуровневая модель поворотных точек ВВП.
3. Выполнен анализ участка маршрута от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера, выбраны поворотные точки и определены их координаты.
4. Приведено описание построения системы матриц, в том числе матрицы перегруппировки.
5. Определены основные факторы, влияющие на эффективность применения перегруппировки ББС на маршруте при прохождении им стесненных участков водного пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин А. В. Управление транспортными потоками в интеллектуальной транспортной системе / А. В. Галкин, А. С. Сысоев // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. — 2020. — Т. 6. — С. 32–35.
2. Мойсеенко С. С. Структура комплекса задач оптимального проектирования мультимодальных грузоперевозок / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер // Балтийский морской форум. Материалы VI Международного Балтийского морского форума, в 6 томах. — Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2018. — Т. 2. — С. 45–51.
3. Тимошек Е. С. Аналитический обзор моделей и методов в управлении работой флота / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 4 (101). — С. 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomtl01/7.
4. Жидкова А. М. Оптимизация конфигурации барже-буксирных составов в зависимости от габаритных и навигационных характеристик внутренних водных путей / А. М. Жидкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 722–735. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-722-735.
5. Патент 2786282 Российская Федерация, МПК В63В 21/62. Способ формирования судового состава / А. М. Жидкова, Е. О. Ольховик; заявл. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. № 2022121005; заявл. 02.08.2022; опубл. 19.12.2022, бюл. № 35.
6. Жидкова А. М. Возможность применения зарубежного опыта эксплуатации барже-буксирных составов в системе водного транспорта России / А. М. Жидкова // Логистика: современные тенденции развития. Материалы XXII Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 177–186.
7. Довгоброд Г. М. Универсальный измеритель скорости поворота для морских и речных судов / Г. М. Довгоброд // Морское оборудование и технологии. — 2020. — № 2 (23). — С. 14–16.
8. Мельник В. Г. Исследование взаимного изменения элементов поворота судна / В. Г. Мельник, А. Н. Штанько // Эксплуатация морского транспорта. — 2018. — № 3 (88). — С. 44–48.
9. Виноградов В. Н. Анализ влияния случайных параметров судна на управляемость и безопасность / В. Н. Виноградов, Н. В. Ивановский, Д. А. Новоселов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 169–181.
10. Клементьев А. Н. Влияние различных факторов на ширину ходовой полосы судна при прохождении поворотов / А. Н. Клементьев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 226–228.
11. Егоров Г. В. Анализ сцепных устройств для толкания морских и речных составов / Г. В. Егоров // Вісник Одеського національного морського університету. — 2014. — № 3. — С. 54–71.
12. Преснов С. В. Автоматические сцепные устройства эксплуатируемых толкаемых составов класса Российского речного регистра / С. В. Преснов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2012. — № 67 (351). — С. 109–116.

REFERENCES

1. Galkin, A. V., and A. S. Sysoev. “Controlling traffic flows in intelligent transportation system.” *Proceedings of the International Conference Mathematical Methods in Technique and Technologies* — ММТТ 6 (2020): 32–35.

2. Moysenko, Sergey, and Leonid Meyler. "A structure of a complex of problems of optimal designing multimodal cargo transportation." *Baltiyskij morskoy forum. Materialy VI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma*. Vol. 2. Kaliningrad: Kaliningradskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2018. 45–51.
3. Timoshek, E. S., and T. E. Malikova. "Analytical review of models and methods in fleet management." *Jekspluatatsija morskogo transporta* 4(101) (2021): 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomtl01/7.
4. Zhidkova, Anastasiya M. "Optimization of the barge-towing combinations configuration depending on the overall and navigational characteristics of inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 722–735. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-722-735.
5. Zhidkova, A. M., and E. O. Ol'hovik. RU 2 786 282 C1, IPC B63B 21/62. Sposob formirovaniya sudovogo sostava. Russian Federation, assignee. Publ. 19 Dec. 2022.
6. Zhidkova, A. M. "Applying foreign experience of the barge-towing trains operation in the Russian water transport system." *Logistika: sovremennye tendencii razvitiya. Materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. SPb.: Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 177–186.
7. Dovgobrod, G. M. "Universal Turn Speed Meter for Sea and River Vessels." *Morskoe oborudovanie i tehnologii* 2(23) (2020): 14–16.
8. Melnik, V. G., and A. N. Shtanko. "The study of the mutual change of the elements of the rotation." *Jekspluatatsija morskogo transporta* 3(88) (2018): 44–48.
9. Vinogradov, V. N., N. V. Ivanovsky, and D. A. Novoselov. "The random parameters influence analysis on the vessel manoeuvrability and safety." *Bulletin of VSAWT* 55 (2018): 169–181.
10. Klementyev, A. N. "Influence of various factors on width of a running strip of a vessel at passage of turns." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2012): 226–228.
11. Egorov, G. V. "Analiz scepnyh ustroystv dlja tolkanija morskikh i rechnyh sostavov." *Visnik Odes'kogo nacional'nogo mors'kogo universitetu* 3 (2014): 54–71.
12. Presnov, S. V. "Avtomaticheskie scepnye ustrojstva jekspluatiruemyh tolkaemyh sostavov klassa Rossijskogo rechnogo registra." *Trudy Central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika AN Krylova* 67(351) (2012): 109–116.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жидкова Анастасия Михайловна —
ведущий специалист по управлению проектами
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zhidkovaam@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhidkova, Anastasiya M. —
Leading Project Management Specialist
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zhidkovaam@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2023 г.

Received: November 9, 2023.

METHODOLOGY FOR ZONING THE NORTHERN SEA ROUTE WATER AREA DURING SALVAGE AND RESCUE OPERATIONS AND OIL SPILL RESPONSE

D. S. Kidzhi^{1,2}, E. O. Ol'khovik¹

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

² — FSUE Atomflot, Murmansk, Russian Federation

A methodology for assessing the possibility of ensuring salvage and rescue operations and oil and oil product spills response throughout the entire water area of the Northern Sea Route has been proposed. From 2024, it is planned to systematically develop year-round navigation along the Northern Sea Route, which will be associated with the need to ensure safety. At the moment, this possibility is severely limited due to the lack of multifunctional vessels of high ice class and technical means for spills response in ices. The methodological basis for determining the response time to marine oil spills in the Polar waters is laid down in the Polar Code, documents of the Maritime Safety Committee of the International Maritime Organization and documents of the Arctic Council, but their application is determined only by the hydrometeorological and geographical conditions at the place of the accident liquidation. Despite their broad and practical focus, the proposed approaches are only of a general methodological nature, which does not take into account the peculiarities of navigation in the waters of the Northern Sea Route, its length and zoning. The developed methodology largely overcomes these limitations and allows, at a qualitative level, to zone the waters of the Northern Sea Route according to three classification criteria. Two model examples are provided in the paper. The first example assumes that shipping occurs only in the western part of the Northern Sea Route, i. e. in the Kara Sea, the Ob Bay and the Yenisei Gulf, and in the eastern sector, shipping is completely absent; the second example assumes that navigation occurs throughout the entire water area. For each option under study, the entire water area is zoned according to the level of readiness, which is assessed as “high”, “medium” and “low” and depends on the presence of icebreakers and multifunctional vessels in the area. In the future, this methodology can be supplemented by an assessment of other factors, such as the influence of hydrometeorological conditions, ice conditions, navigation risks, forecasting the intensity of shipping and the selection of the necessary technical means for oil and petroleum product spills response.

Keywords: Northern Sea Route, ice conditions, oil spill response, salvage and rescue response, shipping routes, Arctic zoning schemes.

For citation:

Kidzhi, Diana S., and Evgeniy O. Ol'khovik. “Methodology for zoning the Northern Sea Route water area during salvage and rescue operations and oil spill response.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1030–1040. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1030-1040.

УДК 528.47

МЕТОДИКА РАЙОНИРОВАНИЯ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ И ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Д. С. Киджи^{1,2}, Е. О. Ольховик¹

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

² — ФГУП «Атомфлот», Мурманск, Российская Федерация

Предложена методика оценки возможности обеспечения проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов во всей акватории Северного морского пути с учетом предполагаемого с 2024 г. планомерного развития круглогодичной навигации по Северному морскому пути,

сопряженного с необходимостью обеспечения безопасности. В настоящее время такая возможность сильно ограничена ввиду отсутствия многофункциональных судов высокого ледового класса и технических средств ликвидации разливов во льдах. Методические основы определения времени реагирования на морские разливы нефти в Полярных водах заложены в Полярном кодексе, документах Комитета по безопасности на море Международной морской организации и документах Арктического совета, однако их применение обусловлено только гидрометеорологическими и географическими условиями в месте ликвидации аварии. Несмотря на их широкую практическую направленность предлагаемые подходы имеют лишь общий методический характер, не учитывающий особенности судоходства в акватории Северного морского пути, ее протяженности и районирования. Разработанная методика во многом преодолевает данные ограничения, позволяя на качественном уровне районировать акваторию Северного морского пути по трем признакам классификации. В статье рассмотрено два модельных примера: в первом предположительно судоходство осуществляется только в западной части акватории Северного морского пути, т. е. в Карском море, Обской губе и Енисейском заливе, в Восточном секторе судоходство полностью отсутствует; во втором примере предположительно судоходство осуществляется во всей акватории. Для каждого исследуемого варианта вся акватория районирована по уровню готовности, который оценивается как «высокий», «средний» и «низкий» и зависит от наличия в районе ледоколов и многофункциональных судов. Отмечается, что в дальнейшем данная методика может быть дополнена оценкой также других факторов, таких как влияние гидрометеоусловий, ледовой обстановки, навигационных рисков, прогноза интенсивности судоходства и выбора необходимых технических средств ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: Северный морской путь, ледовые условия, ликвидация разливов нефти, аварийно-спасательная готовность, судоходные маршруты, схемы районирования Арктики.

Для цитирования:

Киджи Д. С. Методика районирования акватории Северного морского пути при проведении аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти / Д. С. Киджи, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1030–1040. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1030-1040.

Введение (Introduction)

Безопасность в акватории Северного морского пути (СМП) обеспечивается системой организационных и технических мероприятий, благодаря чему в течение последних 30 лет не произошло ни одного крупного происшествия, связанного с серьезными экологическими последствиями (например, разлива топлива или нефтепродуктов [1]). Известна авария танкера «Нордвик»¹, который получил пробоину корпуса в проливе Матисена в условиях мелкобитого льда сплоченностью 5–6 баллов. Координацию в поисково-спасательном районе осуществлял МСКЦ «Диксон», груз топлива с аварийного танкера был частично перегружен на танкер «Борис Вилькицкий». После этого атомные ледоколы «Таймыр» и «Вайгач» вывели суда на чистую воду, и разлива нефтепродуктов не произошло. В исследовании [2] рассмотрены основные риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации, сформулированы исходные предпосылки по оценке минимально допустимого риска морской транспортной системы СМП, в том числе распространяющиеся на навигационные, инфраструктурные риски и последствия чрезвычайных ситуаций в зависимости от ледового класса судов.

В данной работе авторы, отмечая отсутствие научно обоснованной методологии и расчетных критериев, впервые сформулировали проблему необходимости районирования Арктической зоны Российской Федерации, включая акваторию СМП для обеспечения ее комплексной безопасности. В работе [3] предложена схема районирования СМП с точки зрения определения вероятности столкновения судна с айсбергом, которая покрывает западную и северную части Карского моря, Восточно-Сибирское море, северную часть моря Лаптевых и Чукотского морей. Авторы [4] провели исследование факторов, оказывающих влияние на навигационную аварийность при мелководье. Такие условия соответствуют большинству судоходных акваторий СМП. Методы и модели формализованной оценки безопасности акватории СМП с точки зрения оценки рисков представлены в работе [5]. Обзор арктического судоходства за последние 10 лет [6], в том числе с учетом

¹ О ситуации с танкером «Нордвик» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://morflot.gov.ru/news/news2013/n1276/> (дата обращения: 21.11.2023).

транзитных переходов судов с различным ледовым классом, также свидетельствует об отсутствии серьезных инцидентов.

Начиная с 2024 г. запланировано обеспечение круглогодичной морской навигации по СМП^{1,2} что связано с доставкой СПГ в восточном направлении. В процессе реализации находится проект перевалки сжиженного природного газа (СПГ) в бухте Бечевинская на восточном побережье Камчатки компанией «Новатэк». Два хранилища СПГ будут принимать газозовы арктического класса Arc7 с месторождений на полуострове Ямал (Сабетта, Утренний). Точные количественные параметры круглогодичного судоходства в восточном направлении СМП уточняются, но в любом случае будет организовано ледокольное обеспечение навигации в зимне-весенний период. «Новатэк»³ может осуществить отправку сверхпоздней партии СПГ с Ямала в восточном направлении под ледокольной проводкой напрямую на азиатский рынок уже в январе 2024 г., а эксперимент с расширением «окна навигации» будет проходить также с марта по май — в самые сложные месяцы с точки зрения ледовой обстановки. Роль и состав атомного ледокольного флота рассмотрены в работах [7], [8].

Таким образом, появляется новая актуальная проблема, такая как обеспечение и усиление готовности к ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на трассах СМП в круглогодичном режиме. Частными задачами данной проблемы являются изучение возможности привлечения атомного ледокольного флота для ликвидации потенциальных аварий и их последствий, а также исследование рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в навигационно-стесненных акваториях на трассах СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Между государствами — членами Арктического совета принято Соглашение о сотрудничестве в авиационном и морском поиске и спасании в Арктике⁴. Российская Федерация как участник данного Соглашения самостоятельно организует аварийно-спасательные работы в выделенных границах национальной ответственности, к которым относится в которые входит в том числе вся акватория СМП. При этом зона ответственности РФ разграничена на западе с Норвегией, на востоке с США и простирается до Северного полюса. Имеется подробный обзор схем транспортно-географического районирования акватории Арктики, в том числе в аспекте поиска и спасения⁵.

Силы постоянной готовности федерального уровня сформированы единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. ФГБУ «Морспасслужба» [9] совместно с филиалами, морскими спасательно-координационными центрами (МСКЦ) и морскими спасательными подцентрами (МСПЦ) образуют функциональные подсистемы сил и средств по реагированию на чрезвычайные ситуации, в том числе связанные с ликвидацией разливов нефти на море. В акватории СМП действует МСКЦ «Диксон», являющийся структурным подразделением ФГБУ «АМП Западной Арктики», МСПЦ «Тикси», являющийся структурным подразделением филиала ФГБУ «АМП Приморского края и Восточной Арктики» и МСПЦ «Певек», являющийся структурным подразделением филиала ФГБУ «АМП Приморского края и Восточной Арктики». Границы поисково-спасательных районов МСКЦ и МСПЦ в акватории СМП представлены на рис. 1.

При необходимости могут быть привлечены силы МСКЦ и МСПЦ, находящиеся вблизи границ акватории СМП, т. е. Мурманска, Архангельска и Петропавловска-Камчатского. В период летне-осенней навигации (с 01 июля по 15 ноября) в акватории СМП аварийно-спасательные работы и ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов могут быть выполнены многофункциональными

¹ Круглогодичная навигация по СМП будет обеспечена с 2024 года – Новак [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://morvesti.ru/news/1679/106144/> (дата обращения: 04.11.2023).

² «Росатом» и «НОВАТЭК» в 2024 г. запустят круглогодичную навигацию на восток по Севморпути [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.interfax.ru/russia/901869> (дата обращения: 06.11.2023).

³ НОВАТЭК рискнет во льдах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/6382132?tg> (дата обращения: 07.12.2023).

⁴ <https://base.garant.ru/70308806>.

⁵ Marine Rescue Service. Web. 7 Nov. 2023 <<https://morspas.ru/>>.

аварийно-спасательными судами ФГБУ «Морспасслужба», количество которых увеличивается в последние годы и достигло не менее 20 ед. флота, часть из них имеет арктические ледовые классы Arc5 и Icebreaker6,7. Подробный анализ возможности работы флота ФГБУ «Морспасслужба» в акватории СМП выполнен в работе [10].

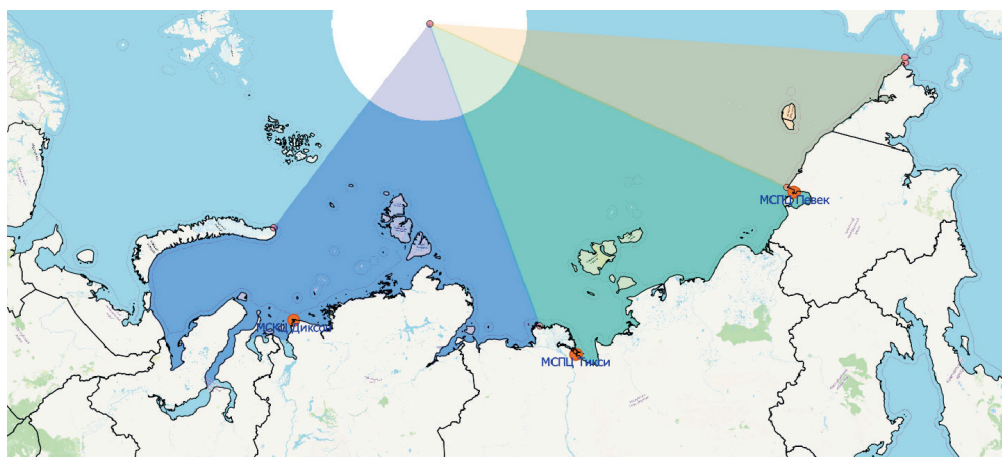


Рис. 1. Границы поисково-спасательных районов МСКЦ Диксон, МСПЦ «Тикси», МСПЦ «Певек» в акватории СМП

Методические основы определения времени реагирования на морские разливы нефти в полярных водах заложены в Полярном кодексе, документах Комитета по безопасности на море Международной морской организации (ИМО) и документах Арктического совета. К методическим основам, определяющим географические, метеорологические и ледовые условия возможности проведения аварийно-спасательных работ и ликвидацию разливов нефти и нефтепродуктов в полярных водах^{1,2}, относятся исследования [11]–[14]. Несмотря на их широкую практическую направленность предлагаемые подходы имеют лишь общий методический характер, не учитывающий особенности судоходства в акватории СМП.

Отсутствие полноценного опыта круглогодичного движения судов в восточном секторе СМП не позволяет получить когнитивную картину возможных вариантов обеспечения аварийно-спасательных работ в период зимне-весенней навигации. В целях исследования за базовый вариант прием возможный набор ситуаций при движении судов по рекомендованным судоходным трассам при ледокольной проводке во всей акватории СМП. В навигационный период, при наличии участков с чистой водой или легким типом ледовых условий, часть судов, имеющих высокий ледовый класс может осуществлять самостоятельное плавание.

Наиболее распространенные и рекомендуемые методы реагирования на разливы нефти и нефтепродуктов подробно описанные в рассматриваемых в данном исследовании Техническом отчете анализа целесообразности ликвидации циркумполярных разливов нефти и Руководстве по анализу жизнеспособности реагирования на циркумполярные разливы нефти, включают:

- механический сбор нефтепродуктов с удержанием их на поверхности воды для дальнейшей утилизации;
- применение диспергаторов для ускорения рассеивания нефтепродуктов в толще воды;
- контролируемое сжигание нефтепродуктов на месте.

Также в Техническом отчете предложены основные методы ликвидации разливов, имеющих определенные ограничения по гидрометеорологическим условиям (подробный подход их анализа формализован в работе [12] в виде такого параметра, как задержка реагирования на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации). Данные методы, по нашему мнению, могут

¹ Circumpolar Oil Spill Response Viability Analysis. Technical Report. Arctic Council Secretariat, 2017.

² Circumpolar Oil Spill Response Viability Analysis Online Portal User Guide. Web. 7 Nov. 2023 <https://maps.dnv.com/cosrva/pdf/COSRVA%20Portal%20Guide.pdf>.

использоваться только при условии отсутствия льда в акватории СМП, т. е. в период летне-осенней навигации. Для обеспечения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в период зимне-весенней навигации в акватории СМП необходимо соблюдать приведенную последовательность действий:

- обеспечить оперативное направление в район бедствия всех судов, находящихся в соседних акваториях, включая ледоколы;
- обеспечить перегрузку нефти или нефтепродуктов с аварийного судна;
- обеспечить безопасную буксировку аварийного судна в место укрытия;
- в случае разлива нефти или нефтепродуктов принять все возможные меры по ликвидации собственными силами.

Поскольку Правила плавания в акватории СМП¹ разделяют его на 28 районов, каждый из которых (или группа) имеет ограничения по критерию допуска судов, будем придерживаться классификации районов по признакам, определяющим возможность оперативного обеспечения аварийно-спасательных работ или ликвидации разливов. Тогда, если в границах отдельного района СМП находятся суда: транспортные и ледоколы – атомные или дизель-электрические; аварийно-спасательные или многофункциональные суда; буксиры ледового класса и т. п., то на качественном уровне готовности данный район будем классифицировать как район «высокой готовности» с обозначением его на карте-схеме зеленым цветом. В случае если в рассматриваемом районе отсутствуют указанные суда, но при этом они находятся в соседнем районе СМП, то данный район будем классифицировать как район «средней готовности» с обозначением его на карте-схеме желтым цветом. В случае если в рассматриваемом районе СМП отсутствуют указанные ранее суда, которые также отсутствуют и в соседних районах, то данный район будем классифицировать как район «низкой готовности» (с обозначением его на карте-схеме красным цветом). Такой подход не исключает возможность учета гидрометеоусловий в районе проведения поисково-спасательных работ или ликвидации разливов, а только уточняет их по критерию оперативного подхода судов, в том числе предполагает возможность более точного расчета времени подхода, что и определяет задержку в реагировании [12].

Развитие водных путей для организации морских транспортных потоков СМП [15], в том числе в восточном секторе [16] при организации круглогодичного судоходства в любом случае требует развития аварийно-спасательного обеспечения, которое в настоящее время практически полностью отсутствуют ввиду удаленности и недостатка специализированного флота высокого ледового класса.

Результаты (Results)

В качестве результатов исследования приведем примеры вариантов разработанных карт-схем районирования акватории СМП, определяющих возможность проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов по предложенной в данном исследовании методике.

Вариант № 1. Рассмотрим вариант, при котором судоходство происходит только в западной части акватории СМП, движение судов выполняется в Карском море, из Баренцева моря (от пролива Карские ворота или севернее мыса Желания) в направлении Обской губы и Енисейского залива (соответственно и в обратную сторону). В северо-восточной части Карского моря и в восточном секторе СМП судоходство отсутствует полностью. Тогда такой вариант описывает разработанная карта-схема, представленная на рис. 2.

Районы готовности в Карском море обеспечиваются движением судов по двум направлениям, наличием атомных и дизель-электрических ледоколов, наличием многофункциональных судов. В акватории Обской губы (порт Сабетта, терминал «Утренний», Новый порт) на постоянной основе

¹ 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: 01.11.2023).

происходит движение СПГ-танкеров и танкеров-челноков сырой нефти. Морской канал в Обской губе обслуживается атомными ледоколами ФГУП «Атомфлот». В порту Сабетта на постоянной основе присутствуют буксиры ледового класса: «Тамбей», «Юрибей», «Надым», на терминале «Утренний» — буксиры ледового класса: «Труженик», «Помор», у терминала Новый порт — многофункциональные ледоколы «Андрей Вилькицкий», «Александр Санников». При необходимости в акватории Обской губы дополнительно работают многофункциональные суда «Балтика» или «Санкт-Петербург».

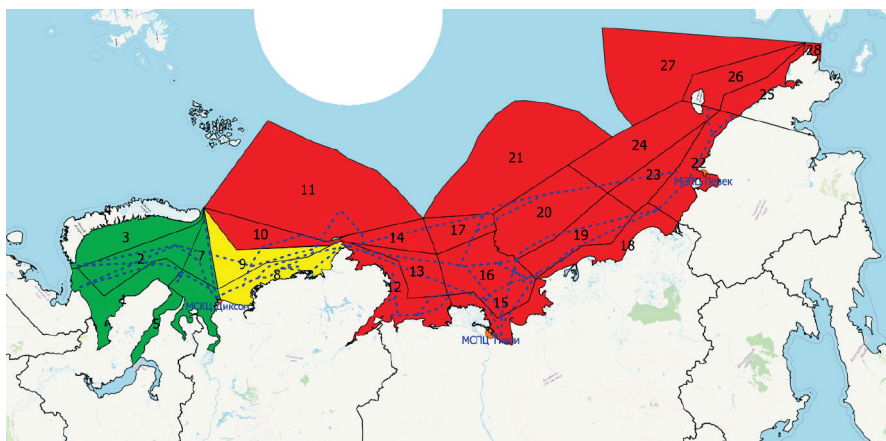
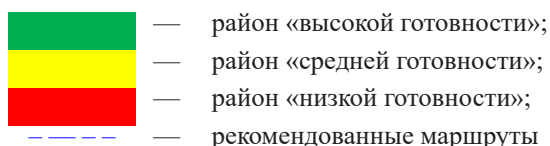


Рис. 2. Карта-схема № 1, определяющая возможность проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов по разработанной методике:



В Енисейском заливе также организовано активное судоходство в направлении порта Дудинка — суда Норильского никеля другие, проход которых при необходимости обеспечивается атомными ледоколами «Вайгач» и «Таймыр». В порту работают ледокол «Дудинка» и буксиры ледового класса. Работу судов, следующих на грузовые терминалы порта «Диксон», терминал «Енисей», терминал «Чайка», терминал «Бухта Север», терминал «Северная звезда», обеспечивают многофункциональные ледовые буксиры «Титан», «Аякс», «Байкал» и др. При необходимости терминалы порта Диксон могут обслуживать многофункциональные дизель-электрические ледоколы.

Таким образом, в соответствии с вариантом № 1 районы СМП № 1–7 обеспечивают «высокую готовность» проведения аварийно-спасательных работ и ликвидацию разливов нефти и нефтепродуктов, организацию которых выполняет МСКЦ Диксон. Районы № 8–9 в северо-восточной части Карского моря относятся к «средней готовности», так как они граничат с районами «высокой готовности» и при необходимости для проведения операций в них возможен приход необходимых судов. Остальные районы акватории СМП в восточном секторе, в соответствии с вариантом № 1, являются районами «низкой готовности», т. е. судоходство в них отсутствует.

Вариант № 2. В случае если судоходство происходит во всей акватории СМП в период зимне-весенней навигации, проход судов с запада выполняется из Баренцева моря севернее мыса Желания, пролив Карские ворота не используется ввиду сложных ледовых условий в Карском море. На востоке проход судов выполняется через Берингов пролив. Преимущественно используются высокоширотные рекомендованные трассы, проходящие севернее Новосибирских островов и пролива Вилькицкого. Направление движения судов — Обская губа, Енисейский залив. В этом варианте схема расстановки атомных ледоколов, скорее всего, изменится, — часть ледоколов перейдет из Карского моря в море Лаптевых и Восточно-Сибирское море. При этом будем считать ледокольную группировку в восточном секторе СМП достаточной, поскольку каждый из ледоколов обеспечивает проход судов по одному-двум районам. Данный вариант описан на разработанной карте-схеме, представленной на рис. 3.

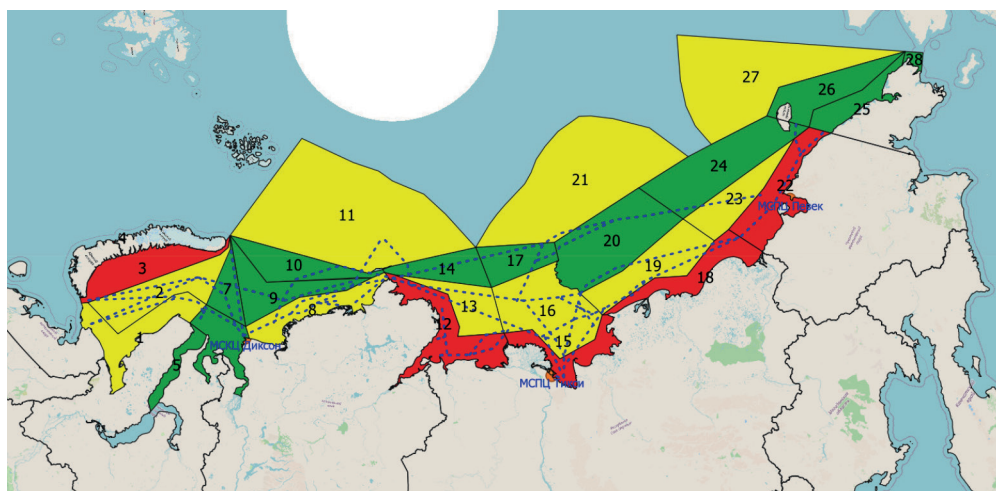
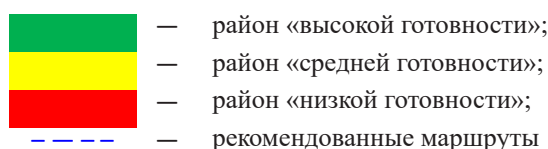


Рис. 3. Карта-схема варианта № 2, определяющая возможность проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов по разработанной методике:



В данном случае обеспечение аварийно-спасательных работ и ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов в акватории Обской губы и Енисейского залива не изменится, так как необходимый флот в порту Сабетта, Дудинка и Диксон не перемещается. В восточном секторе обеспечение работ могут взять на себя атомные ледоколы и суда, выполняющие проход. Наличие многофункциональных судов в восточном секторе на данный момент не представляется возможным по причине их отсутствия. При необходимости возможен их проход с запада или востока. Координацию действий могут осуществлять МСПЦ «Тикси» и МСПЦ «Певек» при условии их перехода на круглогодичный режим работы. Таким образом, районы СМП № 5–7, 9–10, 14, 17, 20, 24–26, 28 следует отнести к районам «высокой готовности», граничащие с ними районы с севера и юга — к районам «средней готовности», прибрежные районы восточного сектора СМП и район в Карском море на границе с Новой землей — к районам «низкой готовности».

Следует учесть, что предложенные варианты № 1 и 2, являясь только модельными, демонстрируют предлагаемый метод районирования акватории СМП с целью оценки оперативности выполнения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. При необходимости метод может выполнять районирование ежемесячно или в другом заданном диапазоне времени.

Обсуждение (Discussion)

В ходе сравнения полученных результатов с проанализированными в ходе настоящего исследования техническими отчетами жизнеспособности реагирования на циркумполярные разливы нефти были выявлены общие различия, которые можно объяснить тем, что в данном случае учитывались только непосредственные факторы наличия необходимого флота, в том числе ледокольного, способного выполнить аварийно-спасательные работы и ликвидацию разливов нефти и нефтепродуктов, факторы и условия влияния гидрометеорологических условий авторами настоящей работы не учитывались, поскольку они являются второстепенными. Дискуссия и исследование по данному вопросу выполнены в работе [17], авторы которой не пришли к единому мнению.

Нерешенным остается вопрос детального учета ледовых условий [18], в том числе в восточном секторе, который до сих пор не имеет точных количественных оценок. Также требует проработки

вопрос возможности проведения работ по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов силами экипажей атомных ледоколов, буксировки аварийных судов [19], [20] в ледовых условиях. В настоящее время технические возможности таких работ в значительной степени ограничены, а сам атомный ледокол не является многофункциональным аварийно-спасательным судном.

В процессе обобщения полученных результатов можно определить направление будущих исследований: создание обобщенного фреймворка, способного в режиме реального времени давать оценку возможности проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов в каждом районе СМП с учетом фактического и прогнозного судоходства, навигационных рисков, условий стесненности акватории, гидрометеорологических условий, ледовых условий, фактического наличия ледокольного флота и многофункциональных судов.

Заключение (Conclusion)

Развитие круглогодичной навигации по СМП сопряжено с необходимостью обеспечения проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов во всей акватории СМП. В настоящее время такая возможность в значительной степени ограничена по причине отсутствия многофункциональных судов высокого ледового класса и технических средств ликвидации разливов во льдах. При этом имеется более чем пятилетний опыт круглогодичного обеспечения аварийно-спасательной готовности в Обской губе и Енисейском заливе, показавший свою эффективность и отсутствие сбоев в работе. Использование этого опыта на всей акватории СМП в сжатые сроки, скорее всего, будет затруднено, но обеспечение локальных зон безопасности, покрывающих основные рекомендованные маршруты, возможно при концентрации имеющегося ледокольного флота и дополнительной подготовки. В работе предложена методика районирования акватории СМП, которая на качественном уровне определяет возможность проведения аварийно-спасательных работ и ликвидации разливов только за счет имеющегося флота и существующей инфраструктуры спасательных центров. В дальнейшем данная методика может быть дополнена оценкой также других факторов, таких как влияние гидрометеорологических условий, ледовой обстановки, навигационных рисков, прогноза интенсивности судоходства и выбора необходимых технических средств ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасарян А. А. Основные экологические проблемы Северного морского пути в перспективе его развития / А. А. Багдасарян // Российская Арктика. — 2020. — № 9. — С. 17–29. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12092.
2. Молчанов В. П. Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации / В. П. Молчанов, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. — М.: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2011. — 300 с.
3. Александров А. В. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газозовозов / А. В. Александров, О. Д. Ивановская, Р. А. Матанцев, В. М. Шапошников // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 76–81. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-76-81.
4. Афонин А. Б. Исследование факторов, влияющих на навигационную аварийность в условиях мелководья / А. Б. Афонин, И. Ю. Королёв, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-735-743.
5. Клюев В. В. Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути / В. В. Клюев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.
6. Gunnarsson B. Ten Years of International Shipping on the Northern Sea Route / B. Gunnarsson, A. Moe // Arctic Review on Law and Politics. — 2021. — Vol. 12. — Pp. 4–30. DOI: 10.23865/arctic.v12.2614.
7. Рукша В. В. Атомный ледокольный флот России и перспективы развития Северного морского пути / В. В. Рукша, А. А. Смирнов, М. М. Кашка, Н. Г. Бабич // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 1 (1). — С. 052–061.
8. Кашка М. М. Роль атомного ледокольного флота в достижении национальной задачи по увеличению объема грузопотока в акватории Северного морского пути / М. М. Кашка, Л. А. Ирлица, Е. А. Ефанская,

К. А. Матвишина, С. А. Головинский // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 1. — С. 101–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-101-110.

9. 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.

10. Григорьев М. Н. Учет сезонности и маршрутов плавания для обеспечения аварийно-спасательных работ в акватории Севморпути / М. Н. Григорьев // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 7. — С. 72–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-72-78.

11. Bartenstein K. Between the polar code and article 234: The balance in Canada's Arctic shipping safety and pollution prevention regulations / K. Bartenstein // Ocean Development & International Law. — 2019. — Vol. 50. — Is. 4. — Pp. 335–362. DOI: 10.1080/00908320.2019.1617932.

12. Зацепина С. Н. Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации / С. Н. Зацепина, А. А. Ивченко, А. Ю. Книжников, В. В. Солбаков // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13. — № 3 (51). — С. 369–381. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-369-381.

13. Fu S. Arctic shipping risk management: A bibliometric analysis and a systematic review of risk influencing factors of navigational accidents / S. Fu, F. Goerlandt, Y. Xi // Safety science. — 2021. — Vol. 139. — Pp. 105254. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105254.

14. Governance of Arctic shipping: Rethinking risk, human impacts and regulation / edited by A. Chircop, F. Goerlandt, C. Aporta, R. Pelot. — Springer Nature, 2020. — 319 p. DOI: 10.1007/978-3-030-44975-9.

15. Ольховик Е. О. Теоретические основы и методология исследования водных путей для организации морских транспортных потоков Северного морского пути: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.17 «Водные пути сообщения и гидрография» / Евгений Олегович Ольховик. — СПб., 2021. — 295 с.

16. Ol'khovik E. Shipping development trends in the Eastern sector of the Northern Sea Route / E. Ol'khovik, A. Tezиков // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June. — 2021. — Pp. 14–18.

17. Донченко В. К. Полемиическая статья по результатам исследования на тему: «Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации» / В. К. Донченко, А. В. Гусев, А. А. Иванчин, М. Н. Мансуров, С. Н. Зацепина, А. А. Ивченко, А. Ю. Книжников, В. В. Солбаков, Я. Ю. Блиновская // Арктика: экология и экономика. — 2023. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-pw1.

18. Пат. 2694085 Российская Федерация, МПК G01W 1/00, G01S 13/95. Способ разведки ледовой обстановки на Северном морском пути / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков; заяв. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — № 2018135927; заявл. 10.10.2018; опубл. 09.07.2019, Бюл. № 19.

19. Добродеев А. А. Как изменилось судоходство в Арктике в XXI веке / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Природа. — 2022. — № 11 (1287). — С. 10–21. DOI: 10.7868/S0032874X22110023.

20. Добродеев А. А. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

REFERENCES

1. Bagdasaryan, A. A. "Main environmental problems in the development of the Northern Sea Route." *Russian Arctic* DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12092.

2. Molchanov, V.P., V. A. Akimov, and Yu. I. Sokolov. *Riski chrezvychainykh situatsii v Arkticheskoi zone Rossiiskoi Federatsii*. M.: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po problemam grazhdanskoj oborony i chrezvychainykh situatsii MChS Rossii, 2011.

3. Aleksandrov, A.V., O. D. Ivanovskaya, R. A. Matantsev, and V. M. Shaposhnikov. "Iceberg risk analysis for the northern sea route: LNG carrier study case." *Arctic: Ecology and Economy* 2(26) (2017): 76–81.

4. Aфонин, Andrej B., Ivan Ju. Korolev, and Aleksandr L. Tezиков. "A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.4 (2017): 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-735-743.

5. Kljuev, V.V. "Formalization of the assessment of safety of routes of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.
6. Gunnarsson, Björn, and Arild Moe. "Ten Years of International Shipping on the Northern Sea Route." *Arctic Review on Law and Politics* 12 (2021): 4–30. DOI: 10.23865/arctic.v12.2614.
7. Ruksha, V.V., A. A. Smirnov, M. M. Kashka, and N. G. Babich. "Atomnyi ledokol'nyi flot Rossii i perspektivy razvitiya Severnogo morskogo puti." *Arctic: Ecology and Economy* 1(1) (2011): 052–061.
8. Kashka, M.M., L. A. Irlitsa, E. A. Efanskaya, K. A. Matviishina, and S. A. Golovinsky. "The role of the nuclear icebreaker fleet in achieving the national goal of increasing in freight traffic in the water area of the Northern Sea Route." *Arctic: Ecology and Economy* 11.1 (2021): 101–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-101-110.
9. 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.
10. Grigoryev, M.N. "Accounting for seasonality and navigation routes to ensure rescue operations in the waters of the Northern Sea Route." *Occupational safety in industry* 7 (2023): 72–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-72-78.
11. Bartenstein, Kristin. "Between the polar code and article 234: The balance in Canada's Arctic shipping safety and pollution prevention regulations." *Ocean Development & International Law* 50.4 (2019): 335–362. DOI: 10.1080/00908320.2019.1617932.
12. Zatsepa, S.N., A. A. Ivchenko, A. Yu. Knizhnikov, and V. V. Solbakov. "Analysis approach to the of meteorological conditions that determine the gap in response to marine oil spills in the arctic zone of the Russian Federation." *Arctic: Ecology and Economy* 13.3(51) (2023): 369–381. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-369-381.
13. Fu, Shanshan, Floris Goerlandt, and Yongtao Xi. "Arctic shipping risk management: A bibliometric analysis and a systematic review of risk influencing factors of navigational accidents." *Safety science* 139 (2021): 105254. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105254.
14. Chircop, Aldo, Floris Goerlandt, Claudio Aporta, and Ronald Pelot. *Governance of Arctic shipping: Rethinking risk, human impacts and regulation*. Springer Nature, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-44975-9.
15. Ol'khovik, E. O. Teoreticheskie osnovy i metodologiya issledovaniya vodnykh putei dlya organizatsii morskikh transportnykh potokov Severnogo morskogo puti. Dr. of Technical Sciences Diss. SPb., 2021.
16. Ol'khovik, Evgeniy, and Aleksandr Tezikov. "Shipping development trends in the Eastern sector of the Northern Sea Route." *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June*. 2021.
17. Donchenko, V. K., A. V. Gusev, A. A. Ivanchin, M. N. Mansurov, S. N. Zatsepa, A. A. Ivchenko, A. Yu. Knizhnikov, V. V. Solbakov, and Ya. Yu. Blinovskaya. "Polemical article on the study results "An approach to the analysis of hydrometeorological conditions that determine the delay in response to marine oil spills in the Arctic zone of the Russian Federation." *Arctic: Ecology and Economics*. 13.4 (2023). DOI: 10.25283/2223-4594-2023-pw1.
18. Ol'khovik, E. O., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. RU 2 694 085 C1, IPC G01W 1/00, G01S 13/95. Sposob razvedki ledovoi obstanovki na Severnom morskome puti. Russian Federation, assignee. Publ. 9 July, 2019.
19. Dobrodeev, A.A., and K. E. Sazonov. "The changes in the arctic shipping in the XXI century." *Priroda* 11(1287) (2022): 10–21. DOI: 10.7868/S0032874X22110023.
20. Dobrodeev, Aleksei A., and Kirill E. Sazonov. "Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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, Мурманск,
тер. Мурманск-17, д. 1
e-mail: dkidzhi@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

*Статья поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.
Received: November 23, 2023.*

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053

RELIABILITY OF RIVER FLEET VESSELS HULL ELEMENTS

A. B. Krasiuk, V. B. Chistov, V. G. Nikifirov

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

Improving the process of fault detection of metal ship hull elements by using a probabilistic approach is considered in the paper. The most labor-intensive part of the defect detection report, namely, measurement and assessment of hull structures individual elements wear, accounting for more than 90 % of the total measurements, is reviewed. Defect detection of a ship hull means the examination, measurement and assessment of defects in each element of the ship hull in order to establish method and volumes of repairs that ensure its reliable operation until the next survey under specified operating conditions. The necessity of carrying out a preliminary calculation stage for defect detection is substantiated. It allows you to significantly reduce the number of measurements of hull structures elements, which will have a positive effect on reducing the cost of repair both due to a smaller number of measurements and the duration of repairs. It has been proved that using the probability approach to predict the residual thickness of individual elements also takes into account the effect on the total strength, which guarantees the reliability of the ship hull in operation. Tables to assess the technical condition of individual hull elements based on their level of wear have been developed, and a method for filling them has improved. The tables are made in two versions, namely, paper and electronic, the most convenient for a specific user — the designer of the defect detection report tables. A test example of using the electronic tables for assessing technical condition by wear level, which proves that the predicted residual thicknesses obtained by calculation will in all cases, be less, than similar ones obtained from measurements results, is carried out using a representative vessel. This proves the reliability and feasibility of using the preliminary defect detection stage, which is essentially an analogue of the concept of the zero stage in ship repair. Using the probability approach to determine the residual thicknesses will allow you not only to reduce the costs of defect detection of the hull itself, but also at early stages (before placing the ship on a slip or dock) to reduce the volume of hull structures repairs, and to choose the most appropriate and effective method of repair.

Keywords: reliability of the ship hull, ship hull fault detection, ship hull element, bond group, average wear rate, average residual thickness, technical condition assessment.

For citation:

Krasiuk, Alla B., Valentin B. Chistov, and Vladimir G. Nikiforov. "Reliability of river fleet vessels hull elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1041–1053. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053.

УДК 625.12:539.4

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСОВ СУДОВ РЕЧНОГО ФЛОТА

А. Б. Красюк, В. Б. Чистов, В. Г. Никифоров

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

Темой исследования является совершенствование процесса дефектации элементов корпусов металлических судов путем использования вероятностного подхода. Рассматривается наиболее трудоемкая часть акта дефектации: измерение и оценка износов отдельных элементов корпусных конструкций, составляющая более 90 % общего числа измерений. Под оптимальной дефектацией в работе понимается минимальное, но достаточное для надежной эксплуатации корпуса судна до момента проведения последующего

(очередного) обследования число измерений корпусных конструкций. Обоснована необходимость проведения предварительного перед дефектацией этапа расчетов, позволяющего существенно сократить количество измерений элементов корпусных конструкций, что положительно отразится на снижении стоимости ремонта как за счет меньшего числа измерений, так и за счет сокращения продолжительности ремонта. Доказано, что использование вероятностного подхода к прогнозированию остаточных толщин отдельных элементов учитывает также влияние на общую прочность, что гарантирует надежность корпуса судна в эксплуатации. Разработаны таблицы для оценки технического состояния отдельных элементов корпуса по уровню их износа и рассмотрена методика их заполнения. Таблицы выполнены в двух вариантах, наиболее удобных для конкретного пользователя — оформителя таблиц акта дефектации: бумажном и электронном. Показан пример применения электронных таблиц оценки технического состояния по уровню износа с использованием судна-представителя, который доказал, что прогнозируемые остаточные толщины, полученные расчетным путем, будут во всех случаях меньше аналогичных, полученных на основе результатов измерений. Это доказывает надежность и целесообразность применения предварительного этапа дефектации, являющегося, по сути, аналогом понятия «нулевой этап в судоремонте». Использование вероятностного подхода к определению остаточных толщин позволит не только сократить затраты непосредственно на процедуру дефектации корпуса, но и даст возможность на ранних (до постановки судна на слип или в док) стадиях прогнозировать объемы, а также выбрать наиболее целесообразный и эффективный способ ремонта корпусных конструкций.

Ключевые слова: надежность корпуса судна, дефектация корпуса, элемент корпуса судна, группа связей, средняя скорость изнашивания, средняя остаточная толщина, оценка технического состояния.

Для цитирования:

Красюк А. Б. Надежность элементов корпусов судов речного флота / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1041–1053. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053.

Введение (Introduction)

Под надежностью корпуса судна понимается его способность выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации при соблюдении периодичности освидетельствований и ремонтов. Данная способность связана с необходимостью обеспечения общей и местной прочности корпуса судна, а также его непроницаемости в целях безопасности плавания и сохранности перевозимого груза. Понятие *надежная эксплуатация корпуса судна* связано с понятиями *дефект* и *отказ*. Все дефекты корпуса судна можно подразделить на три группы: износ, остаточные деформации и разрушения. Перечень дефектов приведен на схеме. Допустимые значения параметров дефектов для корпуса речного судна устанавливаются Правилами Российского Классификационного Общества (далее — РКО). Все виды отказов можно подразделить на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ — отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние. К этому виду отказа относятся остаточные деформации с параметрами, превосходящими допускаемые значения, а также разрушения корпусных конструкций.

Постепенный отказ — это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Данным видом отказа является износ, превосходящий допустимое значение. Поскольку износ представляет собой постепенное уменьшение толщины связей, вызванное различными причинами (коррозией, эрозией или истиранием), данный вид дефекта прогнозируется с достаточной достоверностью.

Надежность корпуса судна оценивается вероятностью появления отказа в заданный промежуток времени. Промежуток времени, в течение которого необходимо обеспечить надежную (безотказную) эксплуатацию, является *межремонтным периодом*. Для корпуса нового судна это период с момента постройки судна до первого крупного среднего ремонта, и далее периоды между крупным ремонтом, последовательно проводимыми средними¹ или между средним и капитальным; для судна, работающего за пределами нормативного срока полезного использования, это промежутки между последовательно проводимыми средними ремонтами или между реновацией (либо модернизацией

¹ Термины «средний ремонт» и «капитальный ремонт» приняты по аналогии с ранее используемой планово-предупредительной стратегией ремонта, поскольку для действующей в настоящее время предупредительной стратегии новая терминология не разработана.

корпуса) и средним ремонтом. По истечении межремонтного периода выполняется *дефектация*¹ и при необходимости ремонт корпуса, обеспечивающий надежную эксплуатацию для заданных условий эксплуатации (класса РКО) на следующий межремонтный период.



Классификация дефектов корпуса судна

Измерение и оценка параметров износов элементов корпуса являются трудоемким процессом, особенно для крупных судов, поднадзорных РКО. Поскольку износ относится к числу постепенных отказов, а скорости изнашивания отдельных групп связей корпусов судов хорошо изучены и формализованы (в табл. 2.2.87 ПКПС²), целесообразным является применение вероятностного подхода для определения прогнозных остаточных толщин в целях сокращения числа замеров при очередном освидетельствовании.

В соответствии с действующими требованиями РКО в ходе дефектации судовладелец должен представить результаты обнаружения и измерения всех дефектов корпуса, в том числе остаточных толщин каждого его элемента. Это приводит к огромному числу избыточных измерений, длительному простоя судна, большим затратам на выполнение работ по обеспечению доступа к обследуемому элементу, а также увеличению оплаты за время нахождения судна на слипе (в доке). Опыт работы с подобными *поэлементными дефектациями* показал, что исполнители дефектации по некоторым сечениям зачастую не выполняют замеры, а просто копируют их с других сечений корпуса либо редактируют материалы дефектаций прошлых лет, что не способствует надежности результатов измерений. Сокращения объемов дефектации можно достичь за счет отказа от измерения дефектов элементов, отказ которых не произойдет с высокой степенью вероятности (например, 0,95).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье [1] предложен новый подход к проведению дефектации, базирующийся на вероятностном подходе определения уровня технического состояния корпуса судна, гарантирующий надежную и безопасную эксплуатацию корпуса судна в течение периода его работы до следующего

¹ Процесс обнаружения, измерения и оценки дефектов корпуса с целью определения его технического состояния, установления способов и объемов ремонта.

² Правила классификации и постройки судов: в 5 т. Т. 2. Ч. I: Корпус и его оборудование. — М.: РКО, 2019.

очередного освидетельствования (следующего межремонтного периода). Было доказано, что использование статистических данных о скорости изнашивания позволяет прогнозировать уровень общей и местной прочности с достаточной достоверностью и является основой разрабатываемой в ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова новой Инструкции по дефектации корпусов судов (далее — Инструкция по дефектации). При разработке этого документа были использованы материалы исследований сотрудников ГУМРФ, опубликованных в статьях [2]–[4].

На основе разработанного ранее подхода и проекта новой Инструкции по дефектации в данной работе исследован вопрос использования вероятностного подхода с практической точки зрения, а именно *оформление результатов дефектации путем составления электронных таблиц*. В целом все электронные таблицы и их аналоги на бумажном носителе, используемые при оформлении результатов дефектации, можно представить в виде следующих вариантов:

Таблица 1. Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа (пример заполнения).

Таблица 1.1. Результаты дополнительных замеров элементов корпуса в наиболее изношенных сечениях (заполняется по результатам предварительных выводов о техническом состоянии элементов корпуса).

Таблица 2. Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа (вариант совмещения расчетов с измерениями).

Таблица 3. Пример заполнения электронного варианта.

В статье рассмотрен порядок заполнения табл. 1 — наиболее трудоемкого этапа дефектации. В ней должны содержаться сведения об остаточных толщинах и уровне износа всех элементов корпуса — *фактическом* и *допустимом*. Табл. 1.1 в работе не приведена, так как является дополнением табл. 1 и заполняется по результатам предварительных выводов о техническом состоянии элементов корпуса. В случае, если при заполнении табл. 1 выявлены связи корпуса (или группы связей), износ которых превышает допустимое значение, то могут потребоваться дополнительные замеры. При отсутствии связей с недопустимым износом в использовании табл. 1.1 нет необходимости.

В настоящей статье внимание акцентировано на изучении прогнозируемого дефекта корпуса судна — *износа*. Рассмотрена общая форма табл. 1 в варианте исполнения на бумажном носителе (форма таблицы заполнена по группе связей «обшивка днища» для одного из сечений корпуса судна). В графе 16 табл. 1 приводится вывод о техническом состоянии элемента («годное» или «не годное» (при годном техническом состоянии элемента графу 16 можно не заполнять). Графа 17 необходима для указания либо способа ремонта (например, «смена» при полистовой или подетальной замене изношенных конструкций) либо в ней даются комментарии к оценке технического состояния, указанного в графе 16. При отсутствии необходимости в ремонте и однозначности оценок технического состояния элемента или группы связей ячейки данной графы не заполняются.

Допустимый износ в столбце 5 табл. 1 рассчитывается как разница между проектной толщиной $t_{пр.i}$ и допустимой остаточной для группы связей $[t_{ост}]$:

$$[\Delta t] = t_{пр.i} - [t_{ост}]. \quad (1)$$

Для каждой группы связей средняя скорость изнашивания $\bar{C}$ устанавливается согласно данным табл. 2.2.87 Правил классификации и постройки судов. Для допустимой скорости изнашивания должны быть рассчитаны следующие величины:

– стандарт скорости изнашивания:

$$\sigma_c = \bar{C}(0,51 - 1,06\bar{C}); \quad (2)$$

– коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma_c}{\bar{C}}. \quad (3)$$

Таблица 1

Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа (пример заполнения)

Район	№ III	Средняя часть							Участок № III-2	Остаточная толщина элемента	Прогнозируемая остаточная толщина	Начало шп.	70		Конеч шп.	79			
		Проектная толщина (толщина по Правилам РКО)	Ширина элемента	Количество лет службы элемента	Допустимый износ элемента в группе связей	Количество элементов в группе связей с одинаковым допусковым износом	Значения замеров по точкам, мм						Характеристика $\Delta F_{ост.i}$ по остаточной толщине	Характеристика $\Delta F_{ост.прот.i}$ по прогнозируемой толщине					
							$t_{пр.i}$, мм	b_i , м									τ_i , лет	$[\Delta]$, мм	n'
Наименование и номер элемента	Район в плане	Борт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
			(пояс / номер)	$t_{пр.i}$, мм	b_i , м	τ_i , лет	$[\Delta]$, мм	n'	$t_{ост1}$	$t_{ост2}$	$t_{ост3}$	$t_{ост}$	$t_{ост.прот.i}$ мм	$[t_{остmin}]$, мм	$[t_{ост}]$, мм	$\Delta F_{ост.i}$, мм ²	$\Delta F_{ост.прот.i}$ (мм ²)	Техническое состояние	Примечания
А			Б		В		Скорость изнашивания												
1. Обшивка днища	VI ск.	ЛБ	8	1,55	7	0,12	Коэффициент вариации			v			Стандарт		σ _c		0,046		
			8	1,58	5	0,8	10	7,9	7,9	7,9	7,8	7,9	7,2	6,0	7,2	7,2	0,00103	-0,00006	
			8	1,47	5	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,9	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00111	0,00032	
			8	1,55	10	0,8	10	7,6	7,9	7,8	7,8	7,8	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00088	0,00029	
			8	1,16	15	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00070	-0,00116	
			8	1,58	3	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00095	0,00070	
	I пояс	ПБ	8	1,58	3	0,8	10	7,9	7,7	7,8	7,8	7,9	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00095	0,00070	
			8	1,58	5	0,8	10	7,9	7,9	7,9	7,8	7,9	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00105	0,00032	
			8	1,55	8	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,9	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00093	-0,00025	
			8	1,47	11	0,8	10	7,8	7,9	7,7	7,8	7,8	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00088	-0,00076	
			8	1,58	12	0,8	10	7,9	7,8	7,9	7,8	7,9	7,2	4,7	7,2	7,2	0,00105	-0,00101	
			8	1,55	15	0,8	10	7,8	7,8	7,7	7,8	7,7	7,2	6,0	7,2	7,2	0,00088	-0,00155	
			Σ													0,01129		-0,00073	

*ПОСЭ — Правила освидетельствования судов в эксплуатации

При известном количестве лет службы элемента в группе связей τ_i прогнозируемая остаточная толщина рассчитывается по формуле

$$t_{\text{ост.прог } i} = t_{\text{пр.}i} - \bar{C}(1 + m' \cdot \sigma_c) \tau_i, \quad (4)$$

где τ_i — количество лет службы элемента в составе группы связей;

m' — коэффициент, определяемый в зависимости от числа элементов в составе группы связей n' с одинаковым значением допустимого износа $[\Delta t]$.

Приведем значения коэффициента m' в составе группы связей n' :

n'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 и более
m'	1,65	1,3	1,07	0,90	0,75	0,63	0,52	0,42	0,33	0,00

Характеристики $\Delta F_{\text{ост } i}$ и $\Delta F_{\text{ост.прог } i}$, рассчитываемые в столбцах 14 и 15 табл. 1, определяются по формулам (5) и (6) соответственно:

$$\Delta F_{\text{ост } i} = b_i (t_{\text{ост } i} - [t_{\text{ост}}]), \quad (5)$$

где $t_{\text{ост } i}$ — остаточная толщина элемента, определенная по результатам измерений в столбце 10 табл. 1;

b_i — размер элемента в плане корпуса судна (ширина пояса обшивки или настила, высота стенки балки набора, ширина стенки балки набора);

$[t_{\text{ост}}]$ — допустимая остаточная толщина группы связей, указанных в столбце 13 табл. 1;

$$\Delta F_{\text{ост.прог } i} = b_i (t_{\text{ост.прог } i} - [t_{\text{ост}}]), \quad (6)$$

где $t_{\text{ост.прог } i}$ — прогнозируемая остаточная толщина элемента, рассчитанная по формуле (4).

По итогам определения характеристик $\Delta F_{\text{ост } i}$, $\Delta F_{\text{ост.прог } i}$ рассчитываются суммы (Σ). При положительных значениях суммы характеристик прочность корпуса судна считается обеспеченной. Отрицательный результат свидетельствует о недостатке уровня прочности по общему износу в группе связей.

Известное число лет службы элемента в составе группы связей позволяет определить целесообразность выполнения замеров данного элемента при очередном освидетельствовании. Так, в табл. 1 итоговая сумма имеет отрицательное значение, поэтому необходимо выполнение измерений остаточных толщин. При этом следует в первую очередь выполнять измерения тех элементов группы связей, характеристика которых имеет отрицательное значение (выделены в табл. 1 фоном). В том случае, если и после данного этапа измерений итоговая сумма столбца 15 останется отрицательной, то следует выполнить измерения оставшихся элементов в группе связей.

Вариант табл. 1, где часть остаточных толщин определена по прогнозу, а часть измерена, приведен в табл. 2, откуда видно, что итоговая сумма после ограниченного числа измерений является положительной, следовательно, измерение остальных элементов не требуется. В табл. 2 фоном отмечены те элементы, для которых выполнены измерения. В этом случае при расчете характеристики столбца 15 последняя была определена не по прогнозной толщине, а по фактически остаточной, как в столбце 14.

Вероятностный подход определения остаточных толщин элементов в группе связей является априори надежным, поскольку фактические остаточные толщины связаны с понятием «средний износ» и средней скоростью изнашивания, а прогнозные остаточные толщины рассчитывались исходя из максимально-возможного износа, что обеспечивает 95%-ю вероятность того, что износ элемента не превысит допустимую величину. Об этом косвенно свидетельствует также и то, что итоговая сумма характеристик, рассчитанная в табл. 2 (0,00867), при совмещении расчетов и измерений меньше суммы, полученной на основе результатов измерений, приведенных в табл. 1 (0,01129). Данное заключение сделано на основе выполненных расчетов.

Предварительные расчеты прогнозных остаточных толщин (подготовительный этап дефектации) дают возможность существенно сократить количество замеров. Так, на примере табл. 1 и 2 продемонстрирован вероятностный подход, позволяющий вместо замеров в 36 точках выполнить измерения только в 21 точке. Использование нового подхода к дефектации, на первый взгляд, кажется сложным, при этом существенно упростить задачу исполнителя дефектации корпуса судна может использование электронных таблиц (табл. 3).

Таблица 2

Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа
(вариант совмещения расчетов с измерениями)

Район	№ III	Средняя часть	Участок № III-2	Нач. шп.	70		Кон. шп.	79									
					Проектная толщина (толщина по Правилам РКО)	Ширина элемента			Количество лет службы элемента	Допускаемый износ элемента в группе связей	Количество элементов в группе связей с одинаковым допустимым износом	Значения зазоров по точкам, мм	Остаточная толщина элемента	Прогнозируемая остаточная толщина	Допускаемая средняя остаточная толщина элементов в группе связей по табл. 3.6.3 ПОСЭ	Характеристика $\Delta F_{ост}^i$ по остаточной толщине	Характеристика $\Delta F_{ост,прог}^i$ по прогнозируемой толщине
Наименование и номер элемента	Борт	$t_{пр}^i$, мм	b_i , м	τ_i , лет	$[\Delta t]$, мм	n'	$t_{ост.1}$	$t_{ост.2}$	$t_{ост.3}$	$t_{ост}^i$	$t_{ост,прог}^i$, мм	$[t_{ост}^i]_{min}$, мм	$[t_{ост}^i]$, мм	$\Delta F_{ост}^i$, мм ²	$\Delta F_{ост,прог}^i$, мм ²	Техническое состояние	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
А		Б	В														
Скорость изнашивания																	
1. Обшивка днища	VI ск.	8	1,55	7	0,8	10	7,9	7,9	7,8	7,9	7,2	6,0	7,2	0,00103	0,00103	0,046	
	V пояс	8	1,58	5	0,8	10	—	—	—	—	7,4	4,7	7,2	—	—	0,00032	
	IV пояс	8	1,47	5	0,8	10	—	—	—	—	7,4	4,7	7,2	—	—	0,00029	
	III пояс	8	1,55	10	0,8	10	7,6	7,9	7,8	7,8	6,8	4,7	7,2	0,00088	0,00088		
	II пояс	8	1,16	15	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	6,2	4,7	7,2	0,00070	0,00070		
	I пояс	8	1,58	3	0,8	10	—	—	—	—	7,6	4,7	7,2	—	—	0,00070	
	I пояс	8	1,58	3	0,8	10	—	—	—	—	7,6	4,7	7,2	—	—	0,00070	
	II пояс	8	1,58	5	0,8	10	—	—	—	—	7,4	4,7	7,2	—	—	0,00032	
	III пояс	8	1,55	8	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,0	4,7	7,2	0,00093	0,00093		
	IV пояс	8	1,47	11	0,8	10	7,8	7,9	7,7	7,8	6,7	4,7	7,2	0,00088	0,00088		
	V пояс	8	1,58	12	0,8	10	7,9	7,8	7,9	7,9	6,6	4,7	7,2	0,00105	0,00105		
	VI ск.	8	1,55	15	0,8	10	7,8	7,8	7,7	7,8	6,2	6	7,2	0,00088	0,00088		
Σ													0,00867				

Таблица 3

Пример заполнения электронного варианта

Район	№ III	Средняя часть						Участок № III-2			Начало шп.	70	Конец шп.	79	Примечание				
		Борт	Проектная толщина (толщина по Правилам РКО)	Ширина элемента	Количество лет службы элемента	Допускаемый износ элемента в группе связей	Количество элементов в группе связей с одинаковым допускаемым износом	Значения замеров по точкам, мм								Остаточная толщина элемента	Коэффициент	Прогнозируемая остаточная толщина	Допускаемая средняя остаточная толщина элементов в группе связей по табл. 3.6.3 ПОСЭ
(пояс/номер)	$t_{пр.i},$ мм		$b_i,$ м	$\tau_i,$ лет	$[\Delta\tau],$ мм	$n',$	$t_{ост1}$	$t_{ост2}$	$t_{ост3}$	$t_{ост.i}$	$m',$	$t_{ост.прог.i},$ мм	$[t_{ост.min}],$ мм	$[t_{ост.i}],$ мм	$\Delta F_{ост.i}^2,$ мм ²				
1		A	Б	В															
Скорость изнашивания				$\bar{C}$	0,14	Коэффициент вариации			v	0,362	Стандарт			σ_e		0,051			
6. Настил второго дна	V пояс	ЛБ		10	0,75	7	2,0	2	9,7	9,8	9,8	9,8	1,3	9,0	8,0	0,00133	0,00072		
	IV пояс			8	1,58	7	1,6	8	7,8	7,7	7,7	7,7	0,42	7,0	6,4	0,00211	0,00095		
	III пояс			8	1,42	7	1,6	8	7,7	7,9	7,7	7,8	0,42	7,0	6,4	0,00194	0,00085		
	II пояс			8	0,966	7	1,6	8	7,9	7,7	7,8	7,8	0,42	7,0	6,4	0,00135	0,00058		
	I пояс	ПБ		8	1,58	7	1,6	8	7,8	7,9	7,7	7,8	0,42	7,0	6,4	0,00221	0,00095		
	I пояс			8	1,58	7	1,6	8	7,9	7,7	7,7	7,8	0,42	7,0	6,4	0,00216	0,00095		
	II пояс			8	1,58	7	1,6	8	7,8	7,8	7,8	7,8	0,42	7,0	6,4	0,00221	0,00095		
	III пояс			8	1,42	7	1,6	8	7,8	7,9	7,8	7,8	0,42	7,0	6,4	0,00204	0,00085		
	IV пояс			8	1,58	7	1,6	8	7,7	7,9	7,6	7,7	0,42	7,0	6,4	0,00211	0,00095		
	V пояс			10	0,75	7	2,0	2	9,7	9,7	9,8	9,7	1,3	9,0	8,0	0,00130	0,00072		
		Σ														0,01875	0,00845		

В процессе исследования в качестве судна-представителя был выбран танкер «Волгонефть-266» класса РКО «ЖМ–СП 3,5» пр. 1577/5886. Данный выбор обусловлен следующими причинами:

- корпус судна обновлен в 2012 г. по пр. 1577/550А-ЛМПП с заменой базовой части корпусных конструкций в грузовой зоне на новые элементы, выполненные из стали повышенной прочности и, следовательно, имеется информация о количестве лет службы элементов корпусных конструкций;
- имеется информация о конструкции корпуса;
- имеется подробная информация о замерах остаточных толщин корпусных конструкций при дефектации в 2019 г. (выполнена поэлементная дефектация);
- ранее выполнен расчет общей прочности теплохода, определены допустимые остаточные толщины связей корпуса с учетом изменения конструкции в 2012 г. и замены базовых элементов конструкций на аналогичные, изготовленные из стали повышенной прочности;
- судно достаточной большое, что обеспечивает большую выборку для анализа;
- качественно выполненная дефектация;
- отсутствие конструкций с язвенным износом (поскольку анализ подобных элементов корпуса выходит за рамки поставленной задачи);
- массовость проекта, позволяющая использовать результаты контрольного примера для выполнения предварительного этапа дефектации на иных судах данной группы.

Общая структура электронного документа. В целях практической реализации вероятностного подхода к формированию дефектации был разработан ряд таблиц MS Excel, которые могут быть впоследствии использованы исполнителями дефектации. Данное программное средство было выбрано ввиду его общедоступности, простоты, а также ввиду того, что в большинстве случаев таблицы замеров оформлялись именно с использованием данных электронных таблиц. При необходимости в будущем разработанные таблицы могут быть легко адаптированы к иному программному продукту (например, «Мой Офис»).

Таблицы, аналогичные табл. 1, были разработаны в трех вариантах:

- для листовых элементов (обшивок и настилов) и набора продольного направления;
- для поперечных переборок и полупереборок;
- для набора поперечного направления.

Расчеты выполнялись только для базовых элементов корпуса, включая конструкции основного корпуса в грузовой зоне, а также конструкции основного корпуса в оконечностях, исключая кницы, бракеты и др. Выполнено сопоставление прогнозных остаточных толщин и характеристик с фактическими, полученными в 2019 г. по результатам дефектации.

Анализ расчетов, выполненных в электронном варианте таблиц. Поскольку в процессе модернизации большая часть корпусных конструкций была заменена на новые, можно точно установить срок службы элемента, а данные о фактических остаточных толщинах этих элементов позволяют оценить достоверность расчета прогнозируемых остаточных толщин путем сравнения последних с результатами измерений.

Незначительные отличия структуры электронной таблицы, пример заполнения которой дан в табл. 3, от табл. 1 состоят в следующем:

- в электронном варианте имеется дополнительный столбец 10' для автоматического определения коэффициента m' , который можно скрыть при выводе документа на печать;
- часть ячеек заполняется автоматически (ячейки, которые должны быть заполнены вручную исполнителем дефектации, выделены в табл. 3 фоном).

В электронную таблицу необходимо ввести следующие данные:

- скорость изнашивания (стандарт и коэффициент вариации рассчитываются автоматически);
- данные о проектных толщинах, ширине элемента, допускаемые остаточные толщины (минимальные и для связей в группе), что позволяет автоматически определить допустимый износ, число лет срока службы элемента и количество элементов с одинаковым допустимым износом — для последующего расчета прогнозируемой остаточной толщины;

— для тех связей, измерение которых выполняется, указываются замеры в трех точках, фактическая остаточная толщина рассчитывается с помощью таблицы, поскольку операнд для расчета имеется в соответствующей ее ячейке. Также в автоматическом режиме рассчитываются характеристики ΔF как по фактическим, так и по прогнозируемым остаточным толщинам. Суммируются характеристики, показывающие избыток или недостаток остаточной площади сечения группы связей.

Из табл. 3 видно, что сумма характеристик $\Delta F_{\text{ост},i}$, рассчитанных по фактическим остаточным толщинам, больше суммы характеристик $\Delta F_{\text{ост.прог},i}$, определенных по прогнозируемой толщине. Такая картина характерна для всех групп связей, проанализированных в рамках выполненного расчета. Это свидетельствует о том, что применение вероятностного подхода в целях сокращения числа измерений элементов корпуса при дефектации гарантирует обеспечение надежности данных элементов корпуса.

Расчеты, выполненные по судну-представителю, показали возможность существенного сокращения числа замеров элементов корпуса. В случае, если бы до выполнения дефектации в 2019 г. были рассчитаны прогнозируемые остаточные толщины и соответствующие им характеристики $\Delta F_{\text{ост.прог},i}$, то число измерений должно было составить:

- по листовым элементам и продольным связям набора — 2629 точек (фактически 9233 точки), что на 70 % меньше фактического количества;
- по поперечным переборкам и полупереборкам — 0 точек (фактически 273 точки) — практически 100%-е сокращение, ограничивающееся индивидуальными проверочными измерениями;
- по набору поперечного направления — 0 точек (фактически 4420 точек).

По корпусу в целом количество необходимых замеров корпусных конструкций судна-представителя составляет 2629 точек, что снижает количество замеров корпусных конструкций по сравнению с фактически выполненным на 81 %.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

Результатом выполненного исследования является пример практической реализации разработанного ранее [1]–[4] вероятностного подхода к определению уровня технического состояния корпуса судна, обеспечивающего надежную (с вероятностью 0,95 и более) эксплуатацию до следующего очередного ремонта.

Возможность использования вероятностного подхода, позволяющая прогнозировать уровень общей и местной прочности с достаточной степенью достоверности, доказана в работах специалистов ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова [1], [3], [4], а также в статьях П. А. Бимберекова [5], [6], О. К. Зяблова, Е. В. Фунтиковой [7], [8], а также В. В. Огнева [9], П. В. Зиновьева, В. А. Компанейца, О. Э. Сурова, С. Н. Гирина, И. А. Гуляева и Ю. А. Ефименкова [10], [11]. Вопросы составления электронных актов и таблиц дефектации рассмотрены в работах Е. П. Бураковского, В. П. Прохница [12], [13], О. К. Зяблова, Ю. А. Кочнева, И. Б. Кочневой [14], О. К. Зяблова, Е. В. Фунтиковой [7]. Необходимость оптимизации числа замеров остаточных толщин корпусных конструкций базируется также на исследованиях, выполненных в работах П. А. Бимберекова [15], Е. Г. Бурмистрова [16], Е. П. Бураковского, Ю. И. Нечаева, П. Е. Бураковского и В. П. Прохница [12].

В данной статье обоснована целесообразность снижения числа измерений остаточных толщин путем использования вероятностного подхода к прогнозированию технического состояния корпусных конструкций. Доказано, что вероятностный подход к прогнозированию остаточных толщин элементов корпуса обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию корпуса до следующего очередного освидетельствования. Обоснована необходимость выполнения предварительного расчетного этапа дефектации, позволяющего снизить трудоемкость и стоимость судовых ремонтных работ.

Отличие выполненного исследования от других работ на эту тему заключается в практической реализации вероятностного подхода, поскольку разработанные «бумажные» и электронные таблицы заложены в основу формирования новой «Инструкции по дефектации корпусов металлических судов», поднадзорных РКО.

Заключение (Conclusion)

Правилами РКО [1] предусмотрено определение технического состояния корпуса судна посредством измерения остаточных толщин каждого его элемента. Данный подход, обеспечивая безусловную надежность полученных результатов, сопряжен с большими затратами как непосредственно на дефектацию, так и на ремонт судна за счет большого числа суток нахождения судна на слипе (в доке).

В результате выполненного исследования доказано следующее:

- применение вероятностного подхода к определению остаточных толщин обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию корпуса судна;
- предварительный (проводимый до момента постановки судна в док или на слип) расчетный этап позволит существенно снизить необходимое число замеров остаточных толщин, что уменьшит затраты на дефектацию и ремонт путем сокращения слипо-сут. или доко-сут.;

Разработаны формы таблиц для прогнозирования и оформления фактических результатов замеров как в «бумажном» варианте, так и в электронном.

Выполненные исследования и разработки:

- выгодны судовладельцу за счет сокращения стоимости ремонтных работ;
- невыгодны компании, выполняющей дефектацию за счет сокращения числа замеров остаточных толщин;
- невыгодны судоремонтному заводу, выполняющему замеры корпусных конструкций собственными силами;
- выгодны судоремонтному заводу, осуществившему перевод процедуру дефектации корпусов судов на аутсорсинг (выполнение дефектации корпусов судов специализированными фирмами по договору) за счет сокращения суток нахождения судна в ремонте и возможности привлечения большего числа судов для ремонта на данном предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Оптимальная дефектация корпусов судов речного флота / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 915–930. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930.
2. Красюк А. Б. Дефектация и ремонт листов ледового пояса ледоколов речного флота / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5(33). — С. 86–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-86-92.
3. Красюк А. Б. Методологические основы дефектации стальных корпусов судов / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 87–93.
4. Барышников С. О. Ремонт и надежность судов речного флота / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Судостроение. — 2021. — № 1 (854). — С. 10–13. DOI: 10.54068/00394580_2021_1_10.
5. Бимбереков П. А. Корректировка методики определения остаточных толщин обшивки и настилов согласно проекту Правил Российского Речного Регистра / П. А. Бимбереков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 1. — С. 7–13.
6. Бимбереков П. А. Определение потребного числа измерений остаточных толщин на участке элемента связи корпуса судна на основе оценочных зависимостей для запаса толщин и рекомендуемых скоростей изнашивания / П. А. Бимбереков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 1. — С. 76–80.
7. Зяблов О. К. Графическое моделирование объектов ремонта в составе электронных актов дефектации по корпусу и ДРК судна / О. К. Зяблов, Е. В. Фунтикова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2012. — № 31. — С. 57–59.
8. Зяблов О. К. Сравнительный анализ правил РРР и РМРС в области освидетельствований и дефектации судов / О. К. Зяблов, А. Н. Науменко // Труды 19-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки-2018». — Н. Новгород: Волжский гос. ун-т водного транспорта, 2018.

9. Огнева В. В. Особенности прогнозирования износов корпусов судов при планировании объемов судоремонта / В. В. Огнева, Е. Г. Бурмистров // Судостроение. — 2014. — № 5 (816). — С. 46–49.
10. Зиновьев П. В. Методика оценки достоверности результатов замеров остаточных толщин при дефектации судовых конструкций / П. В. Зиновьев, В. А. Компанец, О. Э. Суров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 40–41. — С. 41–48.
11. Гирин С. Н. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / С. Н. Гирин, И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С. 18–26.
12. Бураковский Е. П. Эксплуатационная прочность судов / Е. П. Бураковский, Ю. И. Нечаев, П. Е. Бураковский, В. П. Прохнич. — Изд-во «Лань», 2021. — 371 с.
13. Бураковский Е. П. Нормирование параметров прогрессирующих дефектов корпусов судов / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский // Инновации в науке и образовании — 2011. Труды IX Международной научной конференции: В 2 ч. — Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2011. — Ч. 1. — С. 345–347.
14. Зяблов О. К. Автоматизированное формирование отчёта по дефектации судна с использованием графо-математической модели корпуса / О. К. Зяблов, Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 59. — С. 62–69.
15. Бимбереков П. А. Некоторые аспекты мониторинга прочности судов в ходе эксплуатации / П. А. Бимбереков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. — С. 155–160.
16. Бурмистров Е. Г. Анализ причин и районов локализации износов наружной обшивки корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания / Е. Г. Бурмистров, Д. А. Кромов // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 70. — С. 15–29. DOI: 10.37890/jwt.vi70.244.

REFERENCES

1. Baryshnikov, Sergei O., Alla B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. “Optimal fault detection of river ship hulls.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 915–930. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930.
2. Krasnyuk, Alla Borisovna, and Valentin Borisovitch Tchistov. “Defect detection and repair of ice belt sheets for inland water icebreakers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 86–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-86-92/
3. Krasnyuk, A. B., and V. B. Chistov. “Methodological outlines of the defect detection of the vessels steel hulls.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2013): 87–93.
4. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina, and V. B. Chistov. “Repair and reliability of river service ships.” *Sudostroenie* 1(854) (2021): 10–13. DOI: 10.54068/00394580_2021_1_10/
5. Bimberekov, Pavel Alexandrovich. “Adjustment of the methods of determination of the residual thickness of the plating in accordance with the project of Russian river registry.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2015): 7–13.
6. Bimberekov, P. A. “Determination of needed number of measurements of residual thicknesses on part of ship hull connection element on base of relationships for reserve of thicknesses and recommended rates of wear.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2015): 76–80.
7. Zyablov, O. K., and E. V. Funtikova. “Graphics modeling of repair items included in hull and propulsion and steering assembly fault finding sheets presented in electronic form.” *Bulletin of VSAWT* 31 (2012): 57–59.
8. Zyablov, O. K., and A. N. Naumenko. “Comparative analysis of the rules of RMRS and RRR in the field of survey and inspection of ships.” *Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma “Velikie reki-2018”*. Nizhnii Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2018.
9. Oгнева, V. V., and E. G. Burmistrov. “Features of forecasting regarding ship hull wear when estimating shiprepair scope.” *Sudostroenie* 5(816) (2014): 46–49.
10. Zinov'ev, P. V., V. A. Kompanets, and O. E. Surov. “Metodika otsenki dostovernosti rezul'tatov zamerov ostatochnykh tolshchin pri defektatsii sudovykh konstrukttsii.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 40–41 (2015): 41–48.
11. Girin, S. N., I. A. Gulyaev, and Yu. I. Efimenkov. “General principles of accounting operational limitations for justification of a navigation characteristics of coastal ships.” *Bulletin of VSAWT* 57 (2018): 18–26.

12. Burakovskii, E. P., Yu. I. Nechaev, P. E. Burakovskii, and V. P. Prokhlich. *Ekspluatatsionnaya prochnost' sudov*. Izd-vo «Lan'», 2021.

13. Burakovskiy, E. P., and P. E. Burakovskiy. "Rationing of parameters of progressing defects of the ships hulls." *Innovatsii v nauke i obrazovanii — 2011. Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Vol. 1. Kaliningrad: Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 345–347.

14. Zyablov, Oleg K., Yury A. Kochnev, and Irina B. Kochneva. "Automated generation of the ship fault detection report by using the graphical-mathematical model of the hull." *Bulletin of VSAWT* 59 (2019): 62–69.

15. Bimberekov, P. A. "Same aspects of monitoring of ship hull strength during its exploitation." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 2 (2009): 155–160.

16. Burmistrov, E. G., and D. A. Kromov. "Analysis of the causes and the localization areas of the hull outer plating wear of inland and mixed (river-sea) navigation ships." *Russian Journal of Water Transport* 70 (2022): 15–29. DOI: 10.37890/jwt.vi70.244.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красюк Алла Борисовна —

кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: krasyuk_a_b@mail.ru, kaf_mnt@gumrf.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

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

Krasiuk, Alla B. —

PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: krasyuk_a_b@mail.ru, kaf_mnt@gumrf.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

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 25 октября 2023 г.

Received: October 25, 2023.

SHEAR BUCKLING OF SHIP STRUCTURES RECTANGULAR ELEMENTS

M. V. Sukhoterin, A. A. Sosnovskaya, N. F. Pizhurina

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

In the work to determine the spectrum of critical loads and the corresponding forms of a rectangular clamped panel (plate) buckling under the action of balanced tangential forces on its contour, the Bubnov-Galerkin method using polynomials in two coordinates is proposed. This problem of the ship skin element pure shift does not have an exact closed solution, and the known approximate solutions require an analysis of their accuracy and reliability. The aim of the work is to obtain and analyze analytical solutions using polynomials of various degrees. Approximating deflection functions satisfying all the boundary conditions of the problem are represented sequentially by polynomials of 10th, 12th, 14th, 16th and 18th degrees in two coordinates with undefined coefficients. The solution of the main differential equation of the problem is found approximately in the integral sense, as a result of which homogeneous systems of linear algebraic equations with respect to unknown coefficients of polynomials are obtained. These systems contain a shear load as a parameter. To obtain eigenvalues (critical loads), the determinants of the systems are equated to zero. Numerical results are obtained in the Maple analytical computing system. For each approximation (polynomial), a power equation with respect to the critical load, the solution of which is paired values differing in signs is obtained. The forms of buckling are oblique waves. For a ship skin square panel, the first form of buckling is a single bulge along the diagonal of the panel. The second form is obtained in the form of two bulges directed in opposite directions (symmetrically-antisymmetrically with respect to the diagonals), etc. The numerical results are compared with the results of other authors. It is established that with an increase in the number of the polynomial terms, the initial critical loads and forms of buckling are specified, first of all.

Keywords: rectangular clamped plate, pure shear, ship skin buckling, polynomials, Bubnov-Galerkin method.

For citation:

Sukhoterin, Mikhail V., Anna A. Sosnovskaya, and Natal'ya F. Pizhurina. "Shear buckling of ship structures rectangular elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1054–1065. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1054-1065.

УДК 519.6: 629.12

УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЧИСТОМ СДВИГЕ

М. В. Сухотерин, А. А. Сосновская, Н. Ф. Пижурин

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

В работе для определения спектра критических нагрузок и соответствующих форм потери устойчивости прямоугольной защемленной панели (пластины) под действием уравновешенных касательных усилий на ее контуре предложен метод Бубнова – Галеркина с использованием полиномов по двум координатам. Данная задача чистого сдвига элемента обшивки судна не имеет точного замкнутого решения, а известные приближенные решения требуют анализа их точности и достоверности. Целью настоящей работы является получение и анализ численно-аналитических решений с использованием для последовательных приближений многочленов различной степени. Аппроксимирующие функции прогибов, удовлетворяющие всем граничным условиям задачи, представлены последовательно многочленами 10, 12, 14, 16 и 18 степени по двум координатам с неопределенными коэффициентами. Решение основного дифференциального уравнения задачи находилось приближенно в интегральном смысле, в результате чего были получены однородные системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов полиномов. Эти системы в качестве параметра содержат сдвигающую нагрузку. Для получения собственных чисел (критических нагрузок) определители систем приравнялись нулю. Численные результаты получены в системе

аналитических вычислений *Maple*. Для каждого приближения (многочлена) получено степенное уравнение относительно критической нагрузки, решением которого были парные значения, отличающиеся знаками. Формы потери устойчивости представляли собой косые волны. Для квадратной панели обшивки первой формой потери устойчивости являлась одна выпучина по ее диагонали. Вторая форма была получена в виде двух выпучин, направленных в противоположные стороны (симметрично–антисимметрично относительно диагоналей) и т. д. Выполнено сравнение полученных численных результатов с результатами других авторов. Установлено, что с ростом числа слагаемых полинома уточняются прежде всего начальные критические нагрузки и формы потери устойчивости обшивки судна.

Ключевые слова: прямоугольная защемленная пластина, чистый сдвиг, устойчивость обшивки судна, многочлены, метод Бубнова – Галеркина.

Для цитирования:

Сухотерин М. В. Устойчивость прямоугольных элементов судовых конструкций при чистом сдвиге / М. В. Сухотерин, А. А. Сосновская, Н. Ф. Пижурин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1054–1065. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1054-1065.

Введение (Introduction)

Проблема устойчивости защемленной по контуру прямоугольной панели (пластины) под действием сдвиговых (касательных) усилий, равномерно распределенных вдоль защемленных краев, имеет важное значение при проектировании плоских элементов судовых конструкций. Силowym набором обшивка судна, палубный настил, переборки делятся на прямоугольные элементы, которые можно считать защемленными по всем краям. В отличие от задачи устойчивости под действием нормальной контурной нагрузки в плоскости пластины в данной задаче основное дифференциальное уравнение содержит слагаемое с нечетным порядком смешанной производной по каждой координате, что резко усложняет поиск приближенного решения. Определение критической сдвигающей нагрузки является задачей на собственные числа, которая, как и определение собственных частот колебаний, имеет бесчисленное множество решений. Ранее обычно находили лишь первую (эйлерову) критическую нагрузку, которая может привести к разрушению элемента (и, возможно, всей конструкции), т. е. эйлерова нагрузка считалась разрушающей. Однако появление новых материалов, обладающих высокой упругостью, предназначенных для работы в сложных условиях, требует знания некоторого спектра критических нагрузок и соответствующих форм потери устойчивости. Пластина при эйлеровой нагрузке может не разрушиться, например, при быстром прохождении или при наличии конструктивных ограничителей ее прогибов. Знание спектра критических нагрузок является актуальным также и при изготовлении различных сенсорных датчиков в приборах управления судном.

Первой работой, в которой была получена эйлерова критическая нагрузка для данной задачи, является статья [1], авторами которой для получения численных результатов был использован метод множителей Лагранжа. В работе [2] аппроксимирующая функция представлена конечной формулой. Приближенное решение получено *энергетическим методом*. Следует отметить обзорный отчет [3] по данной проблеме, который охватывает период с 1948 по 1971 гг. В работе [4] для решения задачи использовался метод дифференциальных квадратур, а в [5] — метод конечных разностей (МКР) в сочетании с методом Галеркина. Метод Бубнова – Галеркина применялся также для решения задачи устойчивости прямоугольной пластины под действием осевой сжимающей нагрузки [6]. Аппроксимирующая функция выбиралась в виде двойного тригонометрического ряда. В работе [7] использована аппроксимирующая функция в конечном виде, содержащая особые выражения синуса и косинуса. Собственные числа находились с использованием энергетического метода и метода дифференциальных квадратур. Проверка осуществлялась с помощью метода конечных элементов (МКЭ) пакета ANSYS. В работе [8] получены первые десять критических нагрузок и форм с помощью двумерного обобщенного метода конечного интегрального преобразования. Для сравнения применялся МКЭ ABAQUS. Статья [9] посвящена анализу деформаций судовых панелей с отверстиями при действии касательных усилий на контуре. Использовалась теория первого порядка

деформации при сдвиге (теория Миндлина). В работе [10] исследовалась устойчивость при сдвиге пластин из функционально-градуированного материала с вырезами. Для решения применялся метод *изопараметрических сплайновых конечных полос*. Статьи [11]–[14] посвящены проблеме устойчивости судовых панелей под действием сжимающих усилий в их плоскости, для решения которой использовались гиперβολо-тригонометрические ряды. Данная задача устойчивости прямоугольных элементов обшивки судна в условиях чистого сдвига не имеет точного замкнутого решения, а известные приближенные решения требуют анализа их точности и достоверности.

Целью работы является аналитическое решение проблемы, а также проведение на этой основе численных расчетов критических нагрузок и форм потери устойчивости, а также их сравнение с известными результатами.

Постановка задачи (Formulation of the Problem)

Необходимо определить критические значения равномерно распределенных касательных (сдвигающих) усилий S^* , приложенных на контуре защемленной прямоугольной пластины как элемента обшивки (рис. 1), и соответствующие формы потери устойчивости. Пусть $a \times b \times h$ — размеры пластины (h — постоянная толщина). Начало прямоугольной системы координат XOY поместим в один из углов пластины, оси направим по ее сторонам.

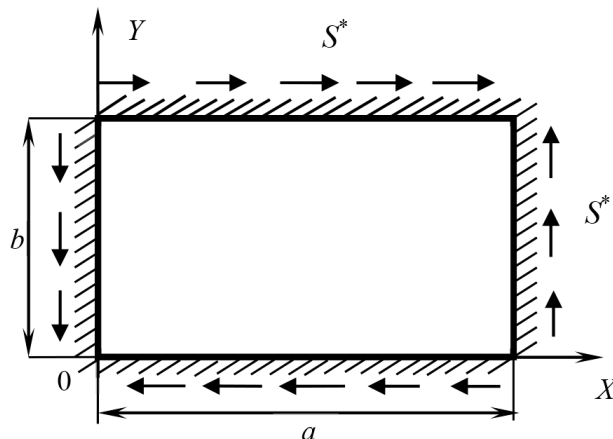


Рис. 1. Защемленная по контуру пластина под действием равномерных сдвигающих усилий

Дифференциальное уравнение изогнутой поверхности при потере устойчивости от касательных усилий имеет вид [15]

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial Y^4} \right) + S^* \frac{\partial^2 w}{\partial X \partial Y} = 0, \quad (1)$$

где $D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]$ — цилиндрическая жесткость пластины;

E — модуль Юнга;

ν — коэффициент Пуассона;

w — прогиб пластины;

$S^* = \text{const}$ — интенсивность касательных сдвигающих усилий.

Введем безразмерные координаты $x = X/b$, $y = Y/b$. Тогда размеры пластины в плане будут $0 \leq x \leq \gamma$, $0 \leq y \leq 1$, где $\gamma = a/b$ — отношение сторон пластины, а дифференциальное уравнение изгиба (1) запишется в виде

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + S \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0, \quad (2)$$

где $S = S^*b^2/D$ — относительные (безразмерные) касательные усилия.

Граничные условия на защемленных краях имеют вид:

$$w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \text{ при } x = 0, x = \gamma; \quad (3)$$

$$w = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0, y = 1. \quad (4)$$

Данная задача является весьма сложной из-за наличия второй смешанной частной производной (при параметре S) в основном уравнении (2). Использование тригонометрических рядов по синусам создает проблемы, связанные с появлением смешанных рядов, содержащих и синусы, и косинусы. Дополнительную сложность вызывают также граничные условия (3), (4).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Будем решать задачу методом Бубнова – Галеркина, согласно которому искомая аппроксимирующая функция прогибов, в данном случае выбранная в виде многочлена по двум переменным, должна удовлетворять прежде всего всем граничным условиям задачи (3), (4), что обеспечивалось основным множителем

$$w_0(x, y) = x^2 (3 - x)^2 y^2 (1 - y)^2, \quad (5)$$

стоящим перед дополнительным многочленом с неопределенными коэффициентами a_k :

$$w_*(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_k x^i y^j, \quad (6)$$

где $n = 1, 2, 3, 4, 5$; $k = 1-4, 1-9, 1-16, 1-25, 1-36$. Предполагалось исследовать влияние количества слагаемых в дополнительном многочлене на точность вычислений собственных значений задачи (критических нагрузок) и определить некоторый спектр собственных значений и соответствующих форм потери устойчивости.

Рассматривались следующие приближения:

$$\begin{aligned} w_I(x, y) &= w_0(x, y)(a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy); \\ w_{II}(x, y) &= w_0(x, y)(a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9x^2y^2); \\ w_{III}(x, y) &= w_0(x, y)(a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9x^2y^2 + \\ &\quad + a_{10}x^3 + a_{11}y^3 + a_{12}x^3y + a_{13}xy^3 + a_{14}x^3y^2 + a_{15}x^2y^3 + a_{16}x^3y^3); \\ w_{IV}(x, y) &= w_0(x, y)(a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9x^2y^2 + a_{10}x^3 + \\ &\quad + a_{11}y^3 + a_{12}x^3y + a_{13}xy^3 + a_{14}x^3y^2 + a_{15}x^2y^3 + a_{16}x^3y^3 + a_{17}x^4 + a_{18}y^4 + a_{19}x^4y + \\ &\quad + a_{20}xy^4 + a_{21}x^4y^2 + a_{22}x^2y^4 + a_{23}x^4y^3 + a_{24}x^3y^4 + a_{25}x^4y^4); \\ w_V(x, y) &= w_0(x, y)(a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9x^2y^2 + a_{10}x^3 + \\ &\quad + a_{11}y^3 + a_{12}x^3y + a_{13}xy^3 + a_{14}x^3y^2 + a_{15}x^2y^3 + a_{16}x^3y^3 + a_{17}x^4 + a_{18}y^4 + a_{19}x^4y + \\ &\quad + a_{20}xy^4 + a_{21}x^4y^2 + a_{22}x^2y^4 + a_{23}x^4y^3 + a_{24}x^3y^4 + a_{25}x^4y^4 + a_{26}x^5 + a_{27}y^5 + \\ &\quad + a_{28}x^5y + a_{29}xy^5 + a_{30}x^5y^2 + a_{31}x^2y^5 + a_{32}x^5y^3 + a_{33}x^3y^5 + a_{34}x^5y^4 + a_{35}x^4y^5 + a_{36}x^5y^5). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, быстрота сходимости и точность метода Бубнова – Галеркина проверялись в пяти приближениях, когда число членов полинома с неопределенными коэффициентами принималось последовательно равным 4, 9, 16, 25 и 36. Выбор такой последовательности числа членов обусловлен возможностью (в дальнейшем) разделения переменных при получении разрешающей системы линейных алгебраических уравнений.

Согласно методу Бубнова – Галеркина [16] коэффициенты полиномов (7) следует находить из условия

$$\int_0^1 \int_0^1 \left(\nabla^4 w + S \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) w_i(x, y) dx dy = 0, \quad (i = 1, \dots, N), \quad (8)$$

где $\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$ — бигармонический оператор;

$w_i = w_0(x, y) \cdot x^i y^j$, $(i, j = 0, \dots, K)$, $(K = 1, \dots, 5)$ — отдельные слагаемые в выражении (7) при соответствующих коэффициентах.

Формула (8) означает, что основное дифференциальное уравнение (2) будет выполнено приближенно в интегральном виде.

Применение метода Бубнова – Галеркина покажем на примере второго приближения w_{II} (7):

$$w(x, y) = x^2 (\gamma - x)^2 y^2 (1 - y)^2 (a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy + a_5 x^2 + a_6 y^2 + a_7 x^2 y + a_8 xy^2 + a_9 x^2 y^2). \quad (9)$$

Примечание. В данной работе исследовались все пять приближений (7).

В выражении (9) для последующего дифференцирования и интегрирования целесообразно разделить переменные:

$$w(x, y) = F(x) \cdot \Phi(y). \quad (10)$$

При этом

$$F(x) = x^2 (\gamma - x)^2 (A_1 + A_2 x + A_3 x^2); \quad (11)$$

$$\Phi(y) = y^2 (1 - y)^2 (B_1 + B_2 y + B_3 y^2), \quad (12)$$

Здесь неопределенные коэффициенты A_i , B_i связаны с коэффициентами полинома (9) следующими соотношениями:

$$a_1 = A_1 B_1, \quad a_2 = A_2 B_1, \quad a_3 = A_1 B_2, \quad a_4 = A_2 B_2, \quad a_5 = A_3 B_1, \quad a_6 = A_1 B_3, \quad a_7 = A_3 B_2, \quad a_8 = A_2 B_3, \quad a_9 = A_3 B_3. \quad (13)$$

Дифференциальный оператор в формуле (8) с учетом (10)–(12) запишется следующим образом:

$$\nabla^4 w + S \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = F^{IV}(x) \Phi(y) + 2F''(x) \Phi''(y) + F(x) \Phi^{IV}(y) + SF'(x) \Phi'(y), \quad (14)$$

где выражения для производных имеют вид:

$$F'(x) = 2\gamma^2 A_1 x + (-6\gamma A_1 + 3\gamma^2 A_2) x^2 + (4A_1 - 8\gamma A_2 + 4\gamma^2 A_3) x^3 + (5A_2 - 10\gamma A_3) x^4 + 6A_3 x^5;$$

$$F''(x) = 2[\gamma^2 A_1 + (-6\gamma A_1 + 3\gamma^2 A_2) x + (6A_1 - 12\gamma A_2 + 6\gamma^2 A_3) x^2 + (10A_2 - 20\gamma A_3) x^3 + 15A_3 x^4];$$

$$F^{IV}(x) = 24[A_1 - 2\gamma A_2 + \gamma^2 A_3 + (5A_2 - 10\gamma A_3) x + 15A_3 x^2];$$

$$\Phi'(y) = 2B_1 y + (-6B_1 + 3B_2) y^2 + (4B_1 - 8B_2 + 4B_3) y^3 + (5B_2 - 10B_3) y^4 + 6B_3 y^5;$$

$$\Phi''(y) = 2[B_1 + (-6B_1 + 3B_2) y + (6B_1 - 12B_2 + 6B_3) y^2 + (10B_2 - 20B_3) y^3 + 15B_3 y^4];$$

$$\Phi^{IV}(y) = 24[B_1 - 2B_2 + B_3 + (5B_2 - 10B_3) y + 15B_3 y^2]. \quad (15)$$

Ввиду того, что в искомом решении (11) переменные разделены, двойные интегралы в системе (8) будут представлены также в виде произведения интегралов от каждой переменной. Приведем вычисленные интегралы, которые войдут в преобразованную систему (8):

$$\int_0^\gamma F(x) x^2 (g - x)^2 dx = \frac{\gamma^9 (22A_1 + 11\gamma A_2 + 6\gamma^2 A_3)}{13860}; \quad \int_0^\gamma F(x) x^3 (g - x)^2 dx = \frac{\gamma^{10} (22A_1 + 12\gamma A_2 + 7\gamma^2 A_3)}{27720};$$

$$\int_0^\gamma F(x) x^4 (g - x)^2 dx = \frac{\gamma^{11} (156A_1 + 91\gamma A_2 + 56\gamma^2 A_3)}{360360}; \quad \int_0^\gamma F'(x) x^2 (g - x)^2 dx = \frac{\gamma^9 (A_2 + \gamma A_3)}{1260};$$

$$\begin{aligned}
 \int_0^{\gamma} F'(x)x^3(g-x)^2 dx &= \frac{\gamma^9(-11A_1+3\gamma^2A_3)}{13860}; \int_0^{\gamma} F'(x)x^4(g-x)^2 dx = -\frac{\gamma^{10}(11A_1+3\gamma A_2)}{13860}; \\
 \int_0^{\gamma} F''(x)x^2(g-x)^2 dx &= -\frac{\gamma^7(4A_1+2\gamma A_2+\gamma^2A_3)}{210}; \int_0^{\gamma} F''(x)x^3(g-x)^2 dx = -\frac{\gamma^8(12A_1+8\gamma A_2+5\gamma^2A_3)}{1260}; \\
 \int_0^{\gamma} F''(x)x^4(g-x)^2 dx &= -\frac{\gamma^9(66A_1+55\gamma A_2+40\gamma^2A_3)}{13860}; \int_0^{\gamma} F^{IV}(x)x^2(g-x)^2 dx = \frac{2\gamma^5}{35}(14A_1+7\gamma A_2+4\gamma^2A_3); \\
 \int_0^{\gamma} F^{IV}(x)x^3(g-x)^2 dx &= \frac{\gamma^6}{35}(14A_1+12\gamma A_2+9\gamma^2A_3); \int_0^{\gamma} F^{IV}(x)x^4(g-x)^2 dx = \frac{\gamma^7}{35}(8A_1+9\gamma A_2+8\gamma^2A_3); \\
 \int_0^1 \Phi(y)y^2(1-y)^2 dy &= \frac{22B_1+11B_2+6B_3}{13860}; \int_0^1 \Phi(y)y^3(1-y)^2 dy = \frac{22B_1+12B_2+7B_3}{27720}; \\
 \int_0^1 \Phi(y)y^4(1-y)^2 dy &= \frac{156B_1+91B_2+56B_3}{360360}; \int_0^1 \Phi'(y)y^2(1-y)^2 dy = \frac{B_2+B_3}{1260}; \\
 \int_0^1 \Phi'(y)y^3(1-y)^2 dy &= \frac{-11B_1+3B_3}{13860}; \int_0^1 \Phi'(y)y^4(1-y)^2 dy = \frac{11B_1+3B_2}{13860}; \\
 \int_0^1 \Phi''(y)y^2(1-y)^2 dy &= -\frac{4B_1+2B_2+B_3}{210}; \int_0^1 \Phi''(y)y^3(1-y)^2 dy = -\frac{12B_1+8B_2+5B_3}{1260}; \\
 \int_0^1 \Phi''(y)y^4(1-y)^2 dy &= -\frac{66B_1+55B_2+40B_3}{13860}; \int_0^1 \Phi^{IV}(y)y^2(1-y)^2 dy = \frac{2}{35}(14B_1+7B_2+4B_3); \\
 \int_0^1 \Phi^{IV}(y)y^3(1-y)^2 dy &= \frac{14B_1+12B_2+9B_3}{35}; \int_0^1 \Phi^{IV}(y)y^4(1-y)^2 dy = \frac{8B_1+9B_2+8B_3}{35}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

С учетом формул (13), (14), (16) из формул (8) после преобразований с использованием вычислительной среды Maple была получена однородная система девяти линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов $a_1, \dots, a_9$ искомой функции прогибов (9), содержащая в качестве параметра сдвиговые усилия S :

$$\begin{aligned}
 &44p_1a_1+22p_1\gamma a_2+22p_1a_3+(11p_1\gamma+S\cdot 11\gamma^4/72)a_4+4p_2\gamma^2a_5+4p_2a_6+(2p_2\gamma^2+S\cdot 11\gamma^5/72)a_7+ \\
 &\quad +(2p_3\gamma+S\cdot 11\gamma^4/72)a_8+(p_4\gamma^2+S\cdot 11\gamma^5/72)a_9=0, \\
 &132p_1a_1+8p_5\gamma a_2+(66p_1-S\cdot 11\gamma^3/12)a_3+4p_5\gamma a_4+2p_6\gamma^2a_5+(12p_3-S\cdot 11\gamma^3/12)a_6+ \\
 &\quad +(p_6\gamma^2+S\cdot \gamma^5/4)a_7+8p_7\gamma a_8+(p_8\gamma^2+S\cdot \gamma^5/4)a_9=0; \\
 &132p_1a_1+(66p_1\gamma-S\cdot 11\gamma^4/12)a_2+8p_9a_3+4p_9\gamma a_4+(12p_2\gamma^2-S\cdot 11\gamma^5/12)a_5+2p_{10}a_6+8p_{11}\gamma^2a_7+ \\
 &\quad +(p_{10}\gamma+S\gamma^4/4)a_8+(p_{12}\gamma^2+S\cdot \gamma^5/4)a_9=0; \\
 &(396p_1+S\cdot 11\gamma^3/2)a_1+24p_5\gamma a_2+24p_9a_3+16p_{13}\gamma a_4+(6p_6\gamma^2-S\cdot 3\gamma^5/2)a_5+(6p_{10}-S\cdot 3\gamma^3/2)a_6+ \\
 &\quad +4p_{14}\gamma^2a_7+4p_{15}\gamma a_8+(p_{16}\gamma^2+S\cdot 9\gamma^5/22)a_9=0; \\
 &312p_2a_1+26p_6\gamma a_2+(156p_2-S\cdot 143\gamma^3/12)a_3+(13p_6\gamma-S\cdot 13\gamma^4/4)a_4+16p_{17}\gamma^2a_5+ \\
 &\quad +(78p_4-S\cdot 143\gamma^3/12)a_6+8p_{17}\gamma^2a_7+(13p_8\gamma-S\cdot 13\gamma^4/4)a_8+8p_{18}\gamma^2a_9=0; \\
 &312p_3a_1+(156p_3\gamma-S\cdot 143\gamma^4/12)a_2+26p_{10}a_3+(13p_{10}\gamma-S\cdot 13\gamma^4/4)a_4+(78p_4\gamma^2-S\cdot 143\gamma^5/12)a_5+
 \end{aligned}$$

$$+16p_{19}a_6 + (13p_{12}\gamma^2 - S \cdot 13\gamma^5 / 4)a_7 + 8p_{19}\gamma a_8 + 8p_{20}\gamma^2 a_9 = 0; \quad (17)$$

$$(936p_2 + S \cdot 143\gamma^3 / 2)a_1 + (78p_6\gamma + S \cdot 39\gamma^4 / 2)a_2 + 624p_{11}a_3 + 52p_{14}\gamma a_4 + 48p_{17}\gamma^2 a_5 +$$

$$+ (78p_{12} - S \cdot 39\gamma^3 / 2)a_6 + 32p_{21}\gamma^2 a_7 + (13p_{16}\gamma - S \cdot 117\gamma^4 / 22)a_8 + 8p_{22}\gamma^2 a_9 = 0;$$

$$(936p_3 + S \cdot 143\gamma^3 / 2)a_1 + 624p_7\gamma a_2 + (78p_{10} + S \cdot 39\gamma^3 / 2)a_3 + 52p_{15}\gamma a_4 + (78p_8\gamma^2 - S \cdot 39\gamma^5 / 2)a_5 +$$

$$+ 48p_{19}a_6 + (13p_{16}\gamma^2 - S \cdot 117\gamma^5 / 22)a_7 + 32p_{23}\gamma a_8 + 8p_{24}\gamma^2 a_9 = 0;$$

$$(5148p_4 + S \cdot 1573\gamma^3 / 2)a_1 + (858p_8\gamma + S \cdot 429\gamma^4 / 2)a_2 + (858p_{12} + S \cdot 429\gamma^3 / 2)a_3 +$$

$$+ (143p_{16}\gamma + S \cdot 117\gamma^4 / 2)a_4 + 528p_{18}\gamma^2 a_5 + 528p_{20}a_6 + 88p_{22}\gamma^2 a_7 + 88p_{24}\gamma a_8 + 64p_{25}\gamma^2 a_9 = 0.$$

где $p_1 = 7\gamma^4 + 4\gamma^2 + 7$; $p_2 = 21\gamma^4 + 11\gamma^2 + 22$; $p_3 = 22\gamma^4 + 11\gamma^2 + 21$;

$$p_4 = 24\gamma^4 + 11\gamma^2 + 24$$
; $p_5 = 63\gamma^4 + 44\gamma^2 + 99$; $p_6 = 147\gamma^4 + 110\gamma^2 + 297$;

$$p_7 = 18\gamma^4 + 11\gamma^2 + 27$$
; $p_8 = 84\gamma^4 + 55\gamma^2 + 162$; $p_9 = 99\gamma^4 + 44\gamma^2 + 63$;

$$p_{10} = 297\gamma^4 + 110\gamma^2 + 147$$
; $p_{11} = 27\gamma^4 + 11\gamma^2 + 18$; $p_{12} = 162\gamma^4 + 55\gamma^2 + 84$;

$$p_{13} = 81\gamma^4 + 44\gamma^2 + 81$$
; $p_{14} = 189\gamma^4 + 110\gamma^2 + 243$; $p_{15} = 243\gamma^4 + 110\gamma^2 + 189$;

$$p_{16} = 567\gamma^4 + 275\gamma^2 + 567$$
; $p_{17} = 147\gamma^4 + 130\gamma^2 + 429$; $p_{18} = 84\gamma^4 + 65\gamma^2 + 234$;

$$p_{19} = 429\gamma^4 + 130\gamma^2 + 147$$
; $p_{20} = 234\gamma^4 + 65\gamma^2 + 84$; $p_{21} = 189\gamma^4 + 130\gamma^2 + 351$;

$$p_{22} = 567\gamma^4 + 325\gamma^2 + 819$$
; $p_{23} = 351\gamma^4 + 130\gamma^2 + 189$; $p_{24} = 819\gamma^4 + 325\gamma^2 + 567$;

$$p_{25} = 693\gamma^4 + 325\gamma^2 + 693.$$

Нетривиальные решения системы (17) можно получить, если приравнять нулю ее определитель и найти собственные числа задачи — критические усилия S_i . Подобные преобразования были выполнены для всех приближений (7). Здесь они не приводятся ввиду отсутствия в этом необходимости.

Результаты, обсуждение (Results, discussion)

В качестве примера был рассмотрен квадратный элемент обшивки ($\gamma = 1$). Равенство нулю определителя системы (17) дает биквадратное уравнение относительно параметра S :

$$2,384805S^4 - 4,94859 \cdot 10^5 \cdot S^2 + 2,48858 \cdot 10^{10} = 0, \quad (18)$$

корни которого являются собственными значениями задачи:

$$S_1 = \pm 292,57940; S_2 = \pm 349,14527. \quad (19)$$

Следует заметить, что отрицательные корни, соответствующие противоположному направлению касательных усилий, показанных на рис. 1, в дальнейшем не принимались во внимание. В работах [2], [8] критические усилия отнесены к величине $2\pi^2$. Если значения (19) разделить на это число, то получим соответственно:

$$F_1^* = 14,822; F_2^* = 17,687. \quad (20)$$

где $F^* = Sb^2 / D2\pi^2$.

Для сравнения в работе [2] первое критическое усилие (эйлерово) составило 14,71, в работе [8] первые два критических усилия — 14,642 и 16,918. Расхождение по эйлеровой нагрузке составило 0,74 % и 1,22 % соответственно. По второй критической нагрузке расхождение с работой [8] более заметно — 4,5 %.

В работе [7] с помощью МКЭ при сетке 9×9 были получены значения первой и второй критических нагрузок: 14,801 и 17,307, близкие к результатам настоящей работы. В работе [5] с помощью МКР было получено первое критическое значение 14,735. Следует отметить, что при удержании в аппроксимирующей функции прогибов только четырех слагаемых также были обнаружены и вычислены две критические нагрузки: $F_1^* = 18,004$ и $F_2^* = 25,422$, что свидетельствует о недостаточной точности этого приближения.

В табл. 1 приведены полученные в данном исследовании результаты при использовании функции второго приближения (девяти слагаемых) для первых двух критических значений, а также результаты, полученные авторами других работ. Следует отметить, что большинство исследователей останавливались лишь на эйлеровом значении.

Таблица 1

Первые два критических значения сдвигающих усилий

Критическое значение	Форма относительно диагонали	Полученные результаты в источниках						
		В данном исследовании	[1]	[2]	[4]	[5]	[7]	[8]
F_1^*	$S-S$	14,822	14,64–14,79	14,71	14,68	14,735	14,801	14,642
F_2^*	$A-S$	17,688	–	–	–	–	17,307	16,918

Формы потери устойчивости для полученных критических нагрузок представляли собой косые волны. Первая форма (выпучина) в виде поперечной располагалась по диагонали квадратной пластины (симметричная относительно диагоналей форма), вторая представляла собой две выпучины, параллельные диагонали и направленные в противоположные стороны пластины (антисимметрично-симметричная относительно диагоналей форма).

В работе [7] приведены плоские графики первой и второй форм потери устойчивости, которые совпали с результатами данного исследования. Далее были рассмотрены последующие приближения (7) для 16, 25 и 36 слагаемых. Результаты вычисления критических нагрузок приведены в табл. 2. Для третьего и четвертого приближений (16 и 25 слагаемых) из разрешающего уравнения для критического параметра S были получены по восемь действительных корней (без учета парных отрицательных значений), для пятого приближения (36 слагаемых) — 14 действительных и четыре комплексных корня. Для последнего случая приведены лишь первые десять действительных критических значений. В последних двух строках табл. 2 представлены результаты работы [8], полученные с помощью двумерного обобщенного метода конечных интегральных преобразований и МКЭ. Результаты, полученные МКЭ, были использованы при анализе точности проведенных в данной работе исследований методом Бубнова – Галеркина.

Таблица 2

Критические усилия защемленной по контуру квадратной пластины при чистом сдвиге

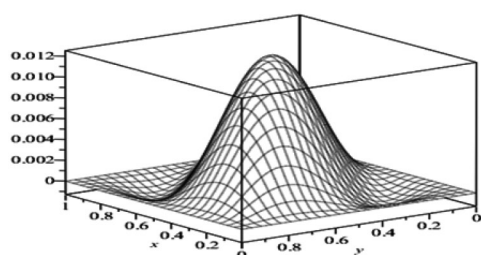
Число членов n , погрешность $\delta, \%$	Относительные критические сдвигающие усилия									
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
$n = 4$	18,004	25,422	–	–	–	–	–	–	–	–
$\delta, \%$	23,0	50,2	–	–	–	–	–	–	–	–
$n = 9$	14,822	17,688	–	–	–	–	–	–	–	–
$\delta, \%$	1,2	4,5	–	–	–	–	–	–	–	–
$n = 16$	14,701	17,052	42,195	46,559	54,092	62,066	104,997	170,787	–	–
$\delta, \%$	0,4	0,8	26,5	31,9	39,7	52,5	104,0	208,6	–	–
$n = 25$	14,651	16,953	35,484	37,827	42,424	45,855	61,729	75,248	–	–
$\delta, \%$	0,05	0,2	6,4	7,2	9,6	12,7	19,9	36,0	–	–
$n = 36$	14,642	16,920	33,960	36,125	39,890	42,305	54,758	61,110	131,804	147,31
$\delta, \%$	0,007	0	1,8	2,3	3,0	3,9	6,4	10,4	83,0	102,0
МКИП [8]	14,642	16,918	33,341	35,295	38,715	40,694	51,472	55,328	71,917	72,793
МКЭ [8]	14,643	16,920	33,345	35,300	38,721	40,701	51,481	55,340	71,936	72,812

Примечание. МКИП — метод конечных интегральных преобразований.

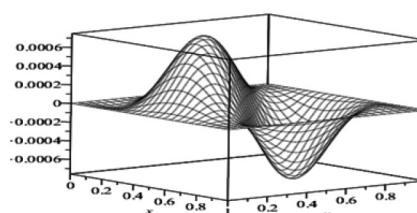
Сравнение соответствующих собственных чисел (критических нагрузок), по мере роста числа слагаемых многочлена с результатами работы [8], показало, что уточняются прежде всего первые собственные числа. Так, при 36 слагаемых первые два числа в точности совпадают с приведенными в работе [8], а расхождение по собственным числам с третьего по шестое составило от 1,8 % до 3,9 %. Далее наблюдалось резкое возрастание расхождения.

На рис. 2 представлены 3D-формы потери устойчивости для первых четырех критических нагрузок при 36 слагаемых в дополнительном многочлене. Формы, приведенные на рис. 2, а, в, симметричны относительно обеих диагоналей пластины, на рис. 2, б, г — симметричны относительно одной диагонали и антисимметричны относительно другой.

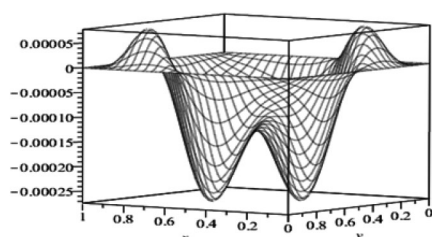
а)



б)



в)



г)

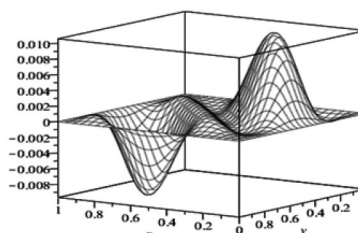


Рис. 2. Потери устойчивости квадратной пластины:

- а — первая форма при сдвигающей нагрузке $F_1 = 14,642$;
- б — вторая форма при сдвигающей нагрузке $F_2 = 16,920$;
- в — третья форма при сдвигающей нагрузке $F_3 = 33,960$;
- г — четвертая форма при сдвигающей нагрузке $F_4 = 36,125$

Полученные формы дают представление о характере деформации элемента обшивки судна (палубного настила, переборок) при потере устойчивости от сдвигающих усилий в процессе эксплуатации судна. Появление подобных косых волн на обшивке и анализ их формы позволяет сделать вывод о величине критических нагрузок, которые могут привести к разрушению данного элемента и всей конструкции.

Заключение (Conclusion)

Метод Бубнова – Галеркина часто используется для приближенного решения многих задач строительной механики судна. Его точность зависит от числа слагаемых в аппроксимирующей функции, которая должна удовлетворять всем граничным условиям задачи, а также от сложности самой краевой задачи. Выбор этой функции в виде полинома по двум координатам приводит к простым операциям дифференцирования и интегрирования и быстро дает приближенное решение при малом количестве слагаемых, однако при их увеличении для достижения более точных результатов сопровождается громоздкими преобразованиями и нуждается в использовании ЭВМ.

В данном случае для получения начального спектра критических сдвигающих усилий и анализа сходимости метода использовались последовательно многочлены 10-й, 12-й, 14-й, 16-й и 18-й степени (число слагаемых в дополнительном многочлене 4, 9, 16, 25 и 36). Вычисления выполнялись в аналитической системе Maple с помощью составленной программы, которая позволяет находить

критические значения и получать соответствующие формы потери устойчивости для защемленных прямоугольных пластин с различным отношением сторон и коэффициентов Пуассона.

Исследования показали, что для получения некоторого спектра критических усилий метод Бубнова – Галеркина сходится недостаточно быстро для собственных чисел с более высокими номерами. Полученные результаты могут быть использованы в проектно-конструкторских организациях судостроения и приборостроения для расчетов на устойчивость прямоугольных плоских элементов различных конструкций при чистом сдвиге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Budiansky B.* Buckling stresses of clamped rectangular flat plates in shear. Technical Note. No. 1559 / B. Budiansky, R. W. Connor. — Washington: NACA, 1948. — 11 p.
2. *Timoshenko S. P.* Theory of Elastic Stability / S. P. Timoshenko, J. M. Gere. — 2nd edition. International Student Edition. — McGraw-Hill Book Company, 1961. — 541 p.
3. *Johns D. J.* Shear buckling of isotropic and orthotropic plates: a review. Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, Ministry of Defense. — London: Her Majesty's Stationery Office, 1971. — 35 p.
4. *Civalek Ö.* Application of differential quadrature (DQ) and harmonic differential quadrature (HDQ) for buckling analysis of thin isotropic plates and elastic columns / Ö. Civalek // Engineering Structures. — 2004. — Vol. 26. — Is. 2. — Pp.171–186. DOI:10.1016/j.engstruct.2003.09.005.
5. *Lopatin A. V.* Buckling of clamped orthotropic plate in shear / A. V. Lopatin, Y. B. Korbut // Composite Structures. — 2006. — Vol. 76. — Is. 1–2. — Pp. 94–98. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.06.014.
6. *Колмогоров Г. Л.* Применение метода Бубнова-Галеркина для оценки устойчивости анизотропных пластин / Г. Л. Колмогоров, Т. Е. Мельникова, Е. О. Азина // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2017. — № 4. — С. 29–33. DOI: 10.22363/1815-5235-2017-4-29-33.
7. *Atashipour S. R.* On the shear buckling of clamped narrow rectangular orthotropic plates / S. R. Atashipour, U. A. Girhammar // Mathematical Problems in Engineering. — 2015. — Vol. 2015. — Article ID 569356. DOI: 10.1155/2015/569356.
8. *Ullah S.* New analytic shear buckling solution of clamped rectangular plates by a two-dimensional generalized finite integral transform method / S. Ullah, J. Zhou, J. Zhang, C. Zhou, H. Wang, Y. Zhong, B. Wang, R. Li // International Journal of Structural Stability and Dynamics. — 2020. — Vol. 20. — No. 02. — С. 2071002. DOI: 10.1142/S0219455420710029.
9. *Zhu Z.* Shear buckling of ship plates with different holes / Z. Zhu, X. Li, Q. Chen, Y. Cai // Mechanics & Industry. — 2022. — Vol. 23. — Article Num. 4. DOI: 10.1051/meca/2022004.
10. *Shahrestani M. G.* Elastic and inelastic buckling of square and skew FGM plates with cutout resting on elastic foundation using isoparametric spline finite strip method / M. G. Shahrestani, M. Azhari, H. Foroughi // Acta Mechanica. — 2018. — Vol. 229. — Pp. 2079–2096. DOI: 10.1007/s00707-017-2082-2.
11. *Барышников С. О.* Устойчивость внешних консольных элементов глубоководных аппаратов / С. О. Барышников, М. В. Сухотерин, Т. П. Кныш // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 347–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-347-358.
12. *Сухотерин М. В.* Определение спектра критических нагрузок и форм равновесия сжатых панелей обшивки корпуса судна / М. В. Сухотерин, Е. В. Потехина, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 44–51.
13. *Сухотерин М. В.* Устойчивость сжатых панелей обшивки судна / М. В. Сухотерин, Т. П. Кныш, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 51–58.
14. *Барышников С. О.* Потеря устойчивости обшивки судна при сложном изгибе / С. О. Барышников, М. В. Сухотерин // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 1 (60). — С. 61–65.
15. *Лехницкий С. Г.* Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. — М.; Л.: ОГИЗ (Гостехиздат), 1947. — 355 с.
16. *Канторович Л. В.* Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. — Л.; М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. — 695 с.

REFERENCES

1. Budiansky, Bernard, and Robert W. Connor. *Buckling stresses of clamped rectangular flat plates in shear*. Technical Note. No. 1559. Washington: NACA, 1948.
2. Timoshenko, Stephen P., and James M. Gere. *Theory of Elastic Stability*. 2nd edition. International Student Edition. McGraw-Hill Book Company, 1961.
3. Johns, D. J. *Shear buckling of isotropic and orthotropic plates: a review*. Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, Ministry of Defense. London: Her Majesty's Stationery Office, 1971.
4. Civalek, Ömer. "Application of differential quadrature (DQ) and harmonic differential quadrature (HDQ) for buckling analysis of thin isotropic plates and elastic columns." *Engineering Structures* 26.2 (2004): 171–186. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.09.005.
5. Lopatin, A.V., and Y. B. Korbut. "Buckling of clamped orthotropic plate in shear." *Composite Structures* 76.1–2 (2006): 94–98. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.06.014.
6. Kolmogorov, G.L., T. E. Melnikova, and E. O. Azina. "Application of the Bubnov-Galerkin method for assessment of stability of non-isotropic plates." *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 4 (2017): 29–33. DOI: 10.22363/1815-5235-2017-4-29-33.
7. Atashipour, Seyed Rasoul, and Ulf Arne Girhammar. "On the shear buckling of clamped narrow rectangular orthotropic plates." *Mathematical Problems in Engineering* 2015 (2015). DOI: 10.1155/2015/569356.
8. Ullah, Salamat, Jianyu Zhou, Jinghui Zhang, Chao Zhou, Haiyang Wang, Yang Zhong, Bo Wang, and Rui Li. "New analytic shear buckling solution of clamped rectangular plates by a two-dimensional generalized finite integral transform method." *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 20.02 (2020): 2071002. DOI: 10.1142/S0219455420710029.
9. Zhu, Zhaoyi, Xiaowen Li, Qinglin Chen, and Yingqiang Cai. "Shear buckling of ship plates with different holes." *Mechanics & Industry* 23 (2022). DOI: 10.1051/meca/2022004.
10. Shahrestani, Mojtaba G., Mojtaba Azhari, and Hamid Foroughi. "Elastic and inelastic buckling of square and skew FGM plates with cutout resting on elastic foundation using isoparametric spline finite strip method." *Acta Mechanica* 229 (2018): 2079–2096. DOI: 10.1007/s00707-017-2082-2.
11. Baryshnikov, Sergej O., Mikhail V. Sukhoterlin, and Tat'yana P. Knysh. "Stability of external cantilever elements of deep-sea vehicles." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 347–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-347-358.
12. Sukhoterlin, Mikhail V., Ekaterina V. Potekhina, and Leonid V. Annenkov. "Determination of the spectrum of critical loads and forms balance compressed cladding panels hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 2(24) (2014): 44–51.
13. Sukhoterlin, Mikhail V., Tat'yana P. Knysh, and Leonid V. Annenkov. "Stability of ship's plating compressed panels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* (2013): 51–58.
14. Baryshnikov, S., and M. Sukhoterlin. "The loss of ship's cover stability in complex bend." *River transport (XXI century)* 1(60) (2013): 61–65.
15. Lekhnitsky, S. G. *Anisotropic plates*. Gordon & Breach, New York, 1968.
16. Kantorovich, L.V., and V. I. Krylov. *Approximate methods of higher analysis*. Translated from the 3rd Russian Edition by C. D. Benster. Groningen, Noordhoff, 1958.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сухотерин Михаил Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sukhoterlinmv@gumrf.ru
Сосновская Анна Анатольевна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sosnovskayaaa@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sukhoterlin, Mikhail V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sukhoterlinmv@gumrf.ru
Sosnovskaya, Anna A. —
Senior lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sosnovskayaaa@gumrf.ru

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

Pizhurina, Natal'ya F. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: pizhurinanf@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 2 октября 2023 г.
Received: October 2, 2023.*

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE COURSE STABILITY
OF A TOWED BARGE MODEL****K. M. Ushakov^{1,2} Yu. V. Yatsuk¹**¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation² — Forss Tekhnologii, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

The course instability problem of towed objects is discussed in the paper. It is noted that many non-self-propelled vessels do not have directional stability, as a result of which they make oscillatory movements relative to the course of the towing ship. Increased yaw rate leads to a decrease in towing speed, an increase in loads on the elements of the towing device and a significant increase in the width of the running lane. These factors can lead to an emergency and significantly complicate the towing process, especially on inland waterways. Two main ways to increase directional stability are considered. These are towing “on V-line”, that is a system in which the towing rope is divided into two parts and attached to two points of the towed barge, located symmetrically relative to the centerline, and the installation of skegs in the stern. To determine the effect of these methods, tests of a model of the mixed river-sea navigation oil barge 2731 are carried out in calm deep water conditions in the experimental tank of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. The root end of the towing rope is attached to the pylon of the towing tank trolley and, thus, the reverse influence of the barge on the characteristics of the tug movement is not taken into account. Sixteen options are considered. The half-width of the running lane is taken as a criterion for the stability of barge movement. As follows from the test results, with increasing towing speed and towing rope length, the width of the running lane increases slightly. The installation of end washers on the skegs has no effect on the stability of the barge. To reduce the width of the running lane occupied by the barge, it is recommended to use towing “on the V-line” and use skegs with fixed flaps.

Keywords: Ship, barge, course stability, ship model test, towing test, skeg, ship maneuverability, ship towing, towrope.

For citation:

Ushakov, Konstantin M., and Yury V. Yatsuk. “Experimental study on the course stability of a towed barge model.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1066–1075. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1066-1075.

УДК 629.5.017.23:629.5.018.717:[656.618.1:656.628.1]**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
МОДЕЛИ БУКСИРУЕМОЙ БАРЖИ****К. М. Ушаков^{1,2}, Ю. В. Яцук¹**¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация² — ООО «Форсс технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрена проблема рыскливости буксируемых объектов. Отмечается, что многие несамоходные суда не обладают курсовой устойчивостью, вследствие чего совершают колебательные движения относительно курса буксировщика. Повышенная рыскливость приводит к снижению скорости буксировки, увеличению нагрузок на элементы буксирного устройства и значительному увеличению ширины ходовой полосы. Данные факторы могут явиться причиной возникновения аварийной ситуации и существенно осложнить процесс буксировки, особенно на внутренних водных путях. Рассмотрены два основных способа повышения курсовой устойчивости: буксировка «на усах», т. е. такая система, при которой буксирный канат разделяется на два и крепится к двум точкам буксируемого судна, расположенным симметрично относительно диаметральной плоскости, а также установка стабилизаторов в кормовом подзоре. Для определения эффективности этих способов в опытовом бассейне Государственного университета морского и речного флота имени адмирала Макарова были выполнены испытания модели нефтеналивной баржи смешанного

река – море плавания пр. 2731 в условиях тихой глубокой воды. Коренной конец буксирного каната крепился к пилону тележки опытового бассейна и, таким образом, обратное влияние баржи на характеристики движения буксира не учитывались. Было рассмотрено шестнадцать вариантов решений, большинство из которых были испытаны при нескольких скоростях буксировки. В качестве критерия устойчивости движения баржи была принята полуширина ходовой полосы. Как следует из результатов испытаний, при увеличении скорости буксировки и длины буксирного троса ширина ходовой полосы несколько возрастает. Установка концевых шайб на стабилизаторах практически не оказывает влияния на устойчивость движения баржи. Для уменьшения ширины ходовой полосы, занимаемой баржей, рекомендуется применять буксировку «на усах» и использовать стабилизаторы с неподвижными закрывками.

Ключевые слова: судно, баржа, модельные испытания, рыскливость, управляемость судов, устойчивость на курсе, буксировка, кормовой стабилизатор, буксирный канат.

Для цитирования:

Ушаков К. М. Экспериментальное исследование курсовой устойчивости модели буксируемой баржи / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1066–1075. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1066-1075.

Введение (Introduction)

В процессе буксировки крупнотоннажной нефтеналивной баржи пр. 2731 было выявлено, что судно обладает повышенной рыскливостью, существенно затрудняющей работу буксира. Известно также, что аналогичные сложности возникали ранее при буксировке барж с большими коэффициентами общей полноты и малой относительной площадью стабилизаторов (например, пр. 81100 и пр. 81540). Для барж пр. 3173/326 в порожнем состоянии опасные явления, связанные с повышенной рыскливостью, наблюдались не только при буксировке, но и на стоянке в акваториях с относительно сильным течением. Изначально эти суда были переоборудованы из теплоходов пр. 326, а существующие рули развернуты и зафиксированы под углом 6° к диаметральной плоскости. Добиться повышения устойчивости удалось перекладкой и фиксацией внутренних рулей на 45° , а внешних — на 80° , что привело к значительному увеличению буксировочного сопротивления. Следует отметить, что Правилами классификационных обществ и иными международными и национальными нормативными документами устойчивость на курсе буксируемых объектов не регламентируется [1].

Цель данного исследования заключалась в экспериментальной оценке эффективности мероприятий, направленных на снижение рыскливости барж до уровня, соответствующего требованиям обеспечения безопасности судоходства.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Проблеме курсовой устойчивости буксируемых объектов посвящено достаточно большое количество работ. Во многих из них исследованы вопросы математического моделирования движения баржебуксирных составов. Так, в статье [2] предпринята попытка создания методологии оценки применимости различных видов математических моделей для процесса управления движением буксирного состава. Авторами [3] рассматривается курсовая устойчивость буксируемого судна при ветре. Варьировались скорость и направление ветра, скорость буксировки, длина и натяжение буксирного троса. При этом буксирный трос заменялся жестким стержнем, а динамические свойства буксировщика не учитывались.

Результаты математического моделирования позволили выявить наиболее опасный с точки зрения натяжения троса курсовой угол ветра, а также показали, что при буксировке «по ветру» амплитуда колебаний буксируемого объекта существенно возрастает. В [4] показано, что при моделировании необходимо учитывать гибкость и удлинение буксирного каната, а также предложен способ учета этих факторов в математической модели. К общим недостаткам ранее указанных работ можно отнести условность определения гидродинамических характеристик буксируемого объекта. Автор [5] при помощи численного эксперимента предпринял попытку определить критерии, характеризующие устойчивость движения буксируемого объекта. В работе [6] эти характеристики определялись с помощью модельного эксперимента.

В численном эксперименте было исследовано влияние на курсовую устойчивость длины буксирного троса, размеров буксира, а также положения точки крепления буксирного троса по длине и ширине. Буксирный трос моделировался цепной линией. В работе [7] приведены результаты исследования курсовой устойчивости баржи, в частности рыскливость и способность следовать за буксиром по криволинейной траектории. В статье [8] рассмотрена курсовая устойчивость поврежденной баржи, в том числе в случаях несимметричного затопления. В приведенных работах отсутствуют рекомендации по улучшению устойчивости буксируемых объектов. Авторы [9] рассматривают результаты исследования процесса буксировки баржи, при этом варьируют способ буксировки на прямом тросе или на «усах», а именно длину троса и «усов». Показано, что буксировка на «усах» позволяет существенно снизить рыскливость буксируемого объекта. В статье [10] приводятся расчеты движения буксируемого судна, совершающего автоколебания, при их компенсации действием руля буксируемого судна. Такой способ применим только при буксировке самоходных судов и в случае, когда может быть использовано рулевое устройство.

Автором работы [11] рассмотрены колебания баржи по курсу как затухающие, а в качестве критерия устойчивости принят коэффициент диссипации колебаний M :

$$\theta = \theta_0 \cdot \exp(-t / T_D); M = \Delta\theta / \theta_m,$$

где θ — курс баржи;

θ_0 — начальное курсовое отклонение баржи от направления движения буксира;

θ_m — экстремальное значение курса в пределах рассматриваемого периода;

$\Delta\theta$ — уменьшение экстремального значения курса за период;

t — время;

T_D — период колебаний по курсу.

Основные выводы в работе [11] заключаются в следующем: стабилизаторы улучшают курсовую устойчивость буксируемого объекта, стабилизаторы должны быть установлены максимально широко, с увеличением длины буксирного троса устойчивость повышается. Следует отметить, что последний вывод вызывает сомнения, поскольку из опыта морских буксировок известно, что увеличение длины буксирного троса вызывает повышенную рыскливость буксируемого объекта, по крайней мере, до тех пор, пока значительная часть буксирного каната не будет погружена в воду [12].

В формате настоящей работы выполнялось экспериментальное исследование курсовой устойчивости буксируемой баржи пр. 2731. При этом варьировались параметры буксирного троса, а также варианты установки стабилизаторов. Исследование выполнялось для условий тихой глубокой воды. Влияние буксировщика на буксируемое судно не учитывалось. Исследования выполнялись с помощью буксировки модели в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Длина бассейна 120 м, ширина — 6,0 м, глубина — около 3,0 м.

Параметры исследуемой баржи:

длина по КВЛ L , м	88
ширина по КВЛ B , м	16
расчетная осадка T , м	3,6
водоизмещение при осадке 3,6 м, м ³	4625
угол установки существующих стабилизаторов α , °	7
площадь существующих стабилизаторов $2S_{ст}$, м ²	$2 \cdot 7,5$
относительная площадь существующих стабилизаторов $\frac{2S_{ст}}{LT}$	0,047

Носовая оконечность баржи имеет ложкообразные, кормовая — санеобразные обводы. В кормовой оконечности баржи установлены «пластинчатые» стабилизаторы. Модель баржи была выполнена в масштабе 1: 40 с комплектом сменных стабилизаторов. Для обеспечения турбулентного обтекания модели в районе первого теоретического шпангоута, в соответствии с требованиями ИТТС [13], был установлен проволоочный турбулизатор диаметром 1 мм. В носовой и кормовой частях модели установлены отбойники для защиты модели от заливания.

Для оценки устойчивости движения модель баржи буксировалась на спокойной воде в опытном бассейне при помощи буксирного троса. Коренной конец буксирного троса крепился к пилону буксировочной тележки на высоте, соответствующей высоте буксирной лебедки буксира. Таким образом, предполагалось, что уход баржи с курса не приводит к изменению курса и скорости буксира. Пересчет скоростей движения с натуры на модель выполнялся по критерию подобия Фруда.

Наблюдения за характером движения модели баржи позволили установить, что при недостаточной эффективности стабилизаторов траектория ее центра тяжести имеет вид синусоиды, поэтому было принято решение оценивать степень рыскливости баржи условными полушириной ходовой полосы B_n (рис. 1) и периодом. В случае установки высокоэффективных стабилизаторов баржа двигалась практически прямым курсом ($B_n = 0$). Измерения выполнялись при постоянной скорости буксировки в квазиустановившемся режиме — до начала измерений баржа имела возможность совершать несколько колебаний.

Примечание. В работе использованы оригинальные схемы, в таблице приведены результаты, полученные в ходе испытаний.

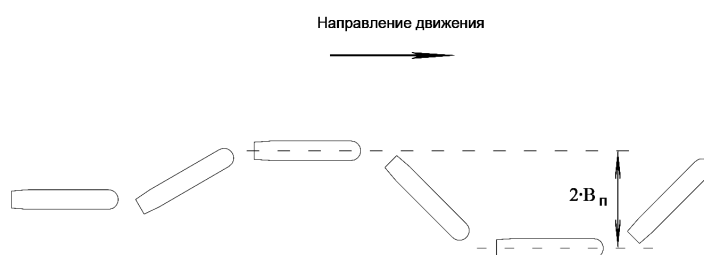


Рис. 1. Схема определения условной полуширины ходовой полосы B_n

Пересчет периода колебаний на натурное судно выполнялся по критерию подобия Струхала:

$$t_n = \frac{V_m t_m L_n}{L_m V_n},$$

где t_n — период рыскания натурной баржи, с;

V_m — скорость движения модели, м/с;

L_m — длина модели, м;

T_m — период рыскания модели, с;

L_n — длина натурной баржи, м;

V_n — скорость натурной баржи, м/с.

Рассмотрено два способа крепления буксирного троса: к барже — к кнехту, находящемуся в диаметральной плоскости баржи, и «усами» длиной около 30 м, проведенными к бортовым кнехтам (рис. 2).

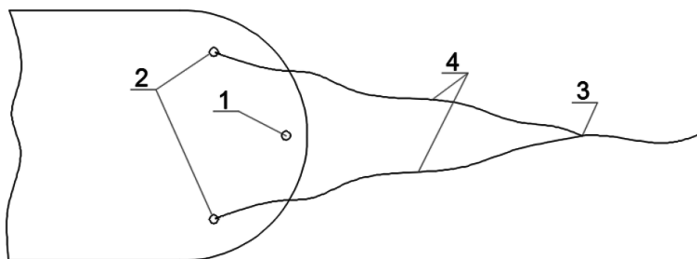


Рис. 2. Схема крепления буксирного троса с «усами» на натурном судне:

1 — существующий буксирный кнехт; 2 — предполагаемое положение бортовых кнехтов;

3 — узел крепления «усов» к основному буксирному тросу; 4 — «усы»

Всего было исследовано 16 вариантов решения, различавшихся между собой способом крепления буксирного троса, формой и углами установки стабилизаторов, а также наличием закрылков стабилизаторов и концевых шайб, установленных в нижней части стабилизаторов, параллельно основной плоскости.

Результаты (Results)

Результаты испытаний, пересчитанные на натурное судно, приведены в следующей сводной таблице:

Длина буксирного троса, м	Скорость буксировки, км/ч	Период колебаний, с	Полуширина ходовой полосы, м
<i>А. Баржа пр. 2731. Буксировка с креплением троса в диаметральной плоскости (см. рис. 2)</i>			
50	5,0	487	24
50	10,0	278	24
50	15,0	196	28
100	10,0	—	32
100	15,0	215	52
130	10,0	354	53
200	5,0	715	60
200	10,0	721	60
200	12,3	297	60
200	15,0	253	60
<i>С. Баржа пр. 2731. Буксировка «на усах» (см. рис. 2)</i>			
130	10,0	316	36
130	15,0	221	38
<i>Д. Баржа пр. 2731 с установленными закрылками и шайбами (рис. 3, а). Буксировка с креплением троса в диаметральной плоскости</i>			
100	10,0	304	24
100	15,0	209	32
200	5,0	588	30
200	10,0	342	34
200	15,0	253	41
<i>Е. Баржа пр. 2731 с установленными шайбами (без закрылков). Буксировка усами</i>			
130	10,0	367	36
<i>Ф. Баржа пр. 2731 с установленными закрылками и шайбами. Буксировка усами</i>			
130	10,0	—	6
130	15,0	190	6
130	15,0	171	8
130	10,0	—	8
<i>Г. Модель по варианту С с увеличенным до 22° углом установки стабилизаторов. Буксировка усами (рис. 3, б)</i>			
130	15,0	234	48
<i>Н. Модель по варианту Г с закрылками. Буксировка усами</i>			
130	10,0	—	2
130	15,0	145	3
<i>И. Вариант с обратной установкой стабилизаторов (угол установки 9°). Буксировка усами (рис. 3, в)</i>			
130	10,0	316	42
<i>Ж. Модель по варианту И с закрылками. Буксировка усами</i>			
130	10,0	—	1
130	15,0	183	3
<i>К. Вариант по пр. 2731 со смещением стабилизаторов к бортам (рис. 3, г). Буксировка с креплением троса в ДП</i>			
130	10,0	316	42
<i>Л. Модель по варианту К с закрылками. Буксировка усами</i>			
130	10,0	348	6
<i>М. Модель с обтекаемыми стабилизаторами с закрылками и шайбами. Минимальный угол установки стабилизаторов (12°). Буксировка с креплением троса в ДП (рис. 3, д)</i>			
100	10,0	291	29
100	15,0	221	26
<i>Н. Модель по варианту М. Буксировка усами</i>			
130	10,0	253	9
<i>О. Модель с обтекаемыми стабилизаторами с закрылками и шайбами. Средний угол установки стабилизаторов (24°). Буксировка усами (рис. 3, е)</i>			
130	10,0	—	3
130	15,0	126	4
<i>Р. Модель с обтекаемыми стабилизаторами с закрылками и шайбами. Максимальный угол установки стабилизаторов (36°). Буксировка усами (рис. 3, ж)</i>			
130	15,0	—	0
<i>Q. Модель с обтекаемыми стабилизаторами с шайбами. Максимальный угол установки стабилизаторов (36°). Буксировка усами</i>			
130	15,0	177	20

Схемы размещения стабилизаторов для рассмотренных в таблице вариантов решения с различными способами крепления буксирного троса, рассчитанные для реального судна, приведены на рис. 3.

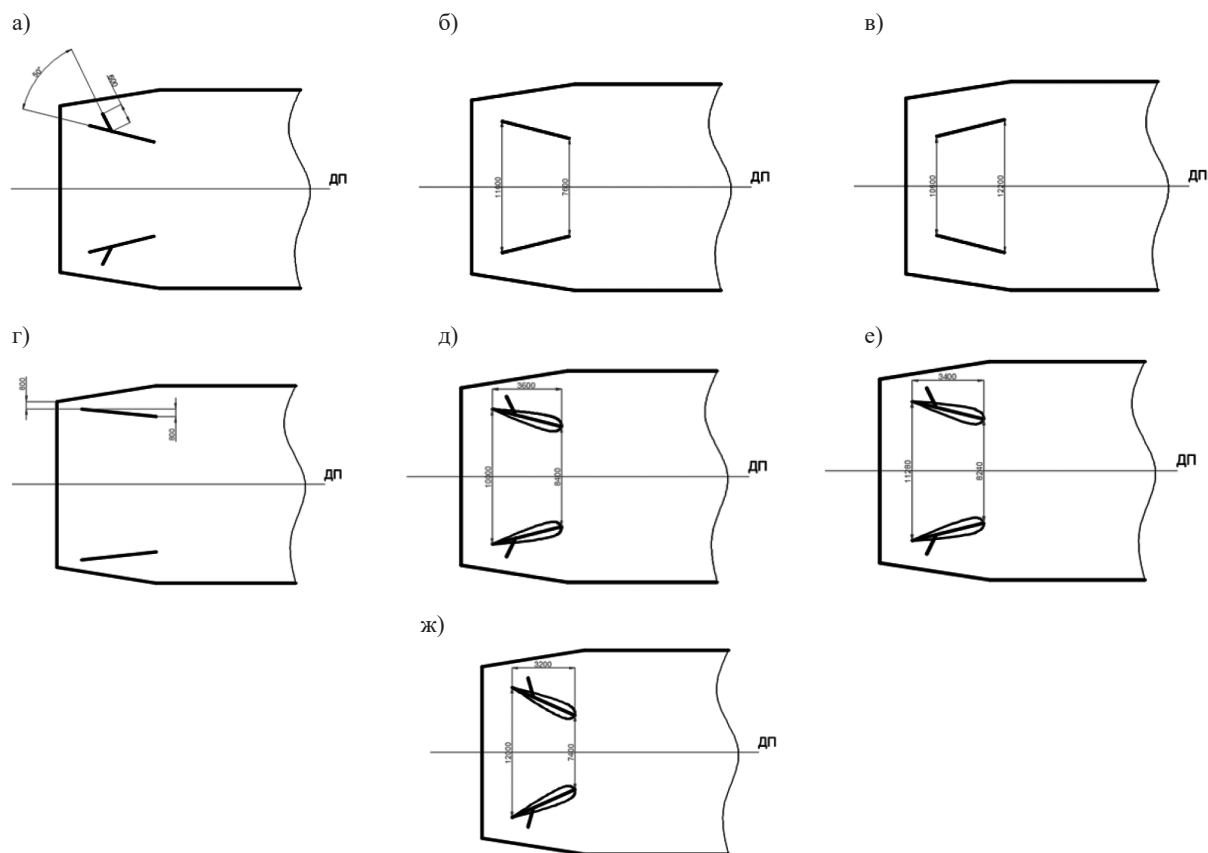


Рис. 3. Схемы размещения стабилизаторов при различных способах крепления буксирного троса:
а — вариант D; б — вариант G; в — вариант I; г — вариант K; д — вариант M; е — вариант O; ж — вариант P

Проведенные испытания позволили установить следующее:

- применение «усов» (вариант C) позволяет уменьшить ширину ходовой полосы в 1,4–1,5 раза по сравнению с исходным вариантом;
- использование закрылков стабилизаторов, имеющих площадь $S_3 \approx 0,2–0,25S_{ст}$, (вариант D), позволяет снизить $B_{п}$ в 1,8–1,9 раза;
- совместное применение этих двух решений (вариант F) позволяет уменьшить полуширину ходовой полосы в 8–9 раз.

Обсуждение (Discussion)

На диаграмме рис. 4 выполнено сопоставление результатов испытаний для различных вариантов буксировки при длине буксирного троса 100–130 м и скорости 10 км/ч (для вариантов G, P, Q приведены данные для скорости 15 км/ч). Для уменьшения полуширины ходовой полосы ВП до величины, сопоставимой с шириной баржи (варианты F, H, J, L, N, O, P), необходима установка стабилизаторов с закрылками и буксировка с применением «усов».

Установка концевых шайб на стабилизаторах (вариант E), предназначенных для ликвидации перетекания жидкости через нижнюю кромку стабилизатора, как следует из таблицы на с. 1070, не приводит к сколь-либо заметному уменьшению степени рыскливости баржи. По-видимому, концевые потери на стабилизаторе (вследствие его большой относительной толщины) относительно невысоки и их ликвидация не приводит к росту эффективности стабилизатора. Увеличение угла установки штатных стабилизаторов (вариант G) по сравнению с исходным, их обратная установка

(вариант I) или смещение по ширине судна (вариант K) без применения закрылков не дали положительного эффекта.

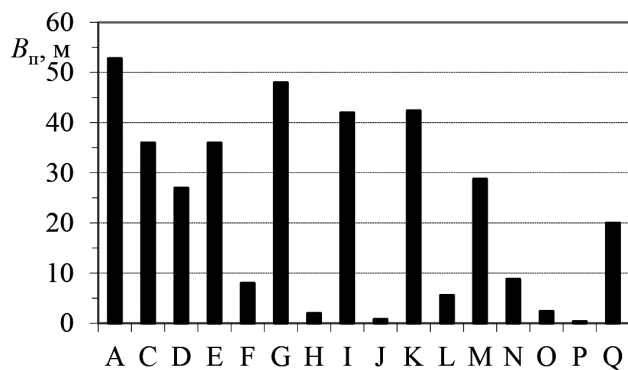
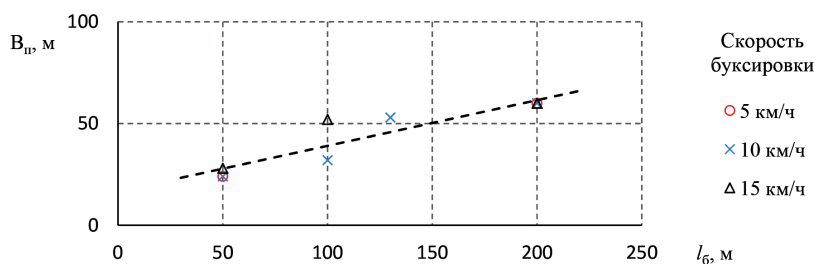


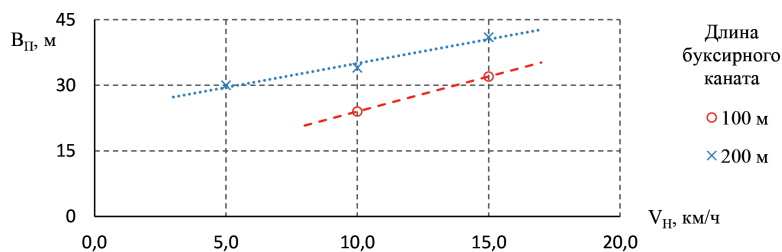
Рис. 4. Условная полуширина ходовой полосы модели $B_{п}$ для различных вариантов буксировки

На рис. 5, а приведены данные о влиянии длины буксирного троса $l_б$ на полуширину ходовой полосы $B_{п}$ (вариант A). Зависимость $B_{п}$ от $l_б$ близка к линейной, а именно чем больше длина троса, тем больше $B_{п}$.

а)



б)



в)

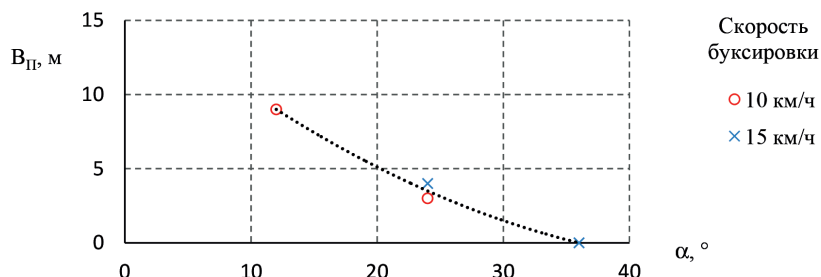


Рис. 5. Зависимость полуширины ходовой полосы $B_{п}$:
а — от скорости хода и длины буксирного конца (вариант A);
б — от скорости хода (вариант D);
в — от угла установки стабилизатора α (варианты N, O, P)

Данные о влиянии скорости буксировки $V_{\text{н}}$ на полуширину ходовой полосы (вариант D) приведены на рис. 5, б. Как видно, эта зависимость также близка к линейной. На рис. 5, в приведены данные о влиянии угла установки обтекаемого стабилизатора с закрылком α (угол между стабилизатором и ДП баржи) на ВП для вариантов N , O , P (буксировка «усами»). Как следует из рис. 5, в, для всех рассмотренных случаев полуширина ходовой полосы на тихой воде невелика.

Применение обтекаемых (профилированных) стабилизаторов без закрылков с уменьшенной (примерно в 2 раза по отношению к исходной) площадью (вариант Q) также не позволяет уменьшить ширину ходовой полосы. Применение обтекаемых стабилизаторов с закрылками с уменьшенной площадью (варианты M – P) является целесообразным при одновременном увеличении установочного угла по сравнению с $\alpha = 7$ – 10° , использованном при исследовании штатных стабилизаторов.

Таким образом, уменьшение ширины ходовой полосы может быть достигнуто путем уменьшения скорости буксировки, увеличения угла установки стабилизаторов и снижения длины буксирного троса. При этом необходимо учитывать, что увеличение угла установки стабилизаторов влечет за собой увеличение буксировочного сопротивления. К такому же результату приводит и значительное уменьшение длины буксирного троса, поскольку с уменьшением расстояния между буксировщиком и баржей возрастает влияние на баржу струй гребных винтов.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для уменьшения ширины ходовой полосы, занимаемой баржей при буксировке до величины, соответствующей требованиям *хорошей морской практики*, необходима установка стабилизаторов с закрылками и буксировка с применением «усов» (варианты F , H , J , L , N , O , P).
2. Установка концевых шайб стабилизаторов не приводит к увеличению их эффективности.
3. Дальнейшее увеличение эффективности работы закрылков, по-видимому, может быть достигнуто за счет их смещения к кормовой части стабилизатора и увеличения их площади.
4. Необходимо отметить, что при неблагоприятных условиях буксировки (ветер, волнение) ширина ходовой полосы может возрасти.
5. Представляется целесообразным проведение дальнейших исследований методами как физического, так и математического моделирования движения баржи при сложных погодных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков К. М. Анализ требований Правил Российского Речного Регистра в части буксирного устройства плавучих объектов / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2020. — С. 345–348.
2. Юдин Ю. И. Выбор модели для исследования управляемости буксирной системы / Ю. И. Юдин, А. В. Бачище, Г. Ю. Ишейкин, Д. Д. Стрельников // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1–2 (43). — С. 11–22.
3. Юдин Ю. И. Устойчивость движения буксируемого судна в условиях ветровой нагрузки / Ю. И. Юдин, Г. Ю. Ишейкин // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 2 (99). — С. 67–77. DOI: 10.34046/aumsuomt99/11.
4. Юдин Ю. И. Управление движением буксируемого судна путем изменения натяжения и длины буксирного троса / Ю. И. Юдин, Г. Ю. Ишейкин // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 4 (105). — С. 10–19. DOI: 10.34046/aumsuomt105/3.
5. Гуров П. В. Исследование характерных маневров буксирного состава при его движении на прямом курсе / П. В. Гуров // Транспортные системы. — 2018. — № 3 (9). — С. 34–43. DOI: 10.46960/62045_2018_3_34.

6. Fitriadhy A. Course stability of a ship towing system / A. Fitriadhy, H. Yasukawa // *Ship Technology Research*. — 2011. — Vol. 58. — Is. 1. — Pp. 4–23. DOI: 10.1179/str.2011.58.1.001.
7. Park S. H. Experimental investigation of towing-and course-stability of a FPSO towed by a tug-boat with lateral motion / S. H. Park, S. J. Lee, S. Lee // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 13. — Pp. 12–23. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.11.003.
8. Baso S. Experimental investigation of course stability on a barge during damaged conditions / S. Baso // *SINERGI*. — 2022. — Vol. 26. — No. 2. — Pp. 173–184. DOI: 10.22441/sinergi.2022.2.006.
9. Zan U. I. Model Experimental Study of a Towed Ship's Motion / U. I. Zan, H. Yasukawa, K. K. Koh, A. Fitriadhy // *The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro2012*. — Malaysia, 2012.
10. Юдин Ю. И. Регулирование процесса автоколебаний буксируемого судна / Ю. И. Юдин, С. О. Петров, В. В. Каян // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2013. — № 2 (72). — С. 38–40.
11. Tanaka M. Experimental study on the course stability of a towed barge / M. Tanaka // *West Japan Society of Naval Architects Trans.* — 1978. — Is. 56. — Pp. 38–46.
12. Жуков Е. И. Управление судном и его техническая эксплуатация: Учебник для учащихся судоводит. спец. высш. инж. мор. училищ / Е. И. Жуков, М. Н. Либензон, М. Н. Письменный [и др.]; под ред. А. И. Щетининой. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1983. — 655 с.
13. ITTC Recommended procedures and guidelines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://itc.info/media/9876/0_0.pdf (дата обращения: 10.10.2023).

REFERENCES

1. Ushakov, K. M., and Yu. V. Yatsuk. "Analysis of the requirements of the Russian River Register rules in the part of the towing device of floating objects." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. SPb.: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2020. 345–348.
2. Udin, Yu. I., A. V. Bachishe, G. U. Isheikin, and D. D. Strelnikov. "Selection of a model to study the controllability of the towing system." *Marine Intellectual Technologies* 1–2(43) (2019): 11–22.
3. Yudin, Yu. I., and G. Y. Ishcheikin. "Stability of the towed vessel movement under wind load conditions." *Operation of Maritime Transport* 2(99) (2021): 67–77. DOI: 10.34046/aumsuomt99/11.
4. Yudin, Yu. I., and G. Yu. Ishcheikin. "Controlling the movement of a towed vessel by changing the tension and length of the towline." *Operation of Maritime Transport* 4(105) (2023): 10–19. DOI: 10.34046/aumsuomt105/3.
5. Gurov, P. V. "Issledovanie kharakternykh manevrov buksirnogo sostava pri ego dvizhenii na pryamom kurse." *Transportnye sistemy* 3(9) (2018): 34–43. DOI: 10.46960/62045_2018_3_34.
6. Fitriadhy, Ahmad, and Hironori Yasukawa. "Course stability of a ship towing system." *Ship Technology Research* 58.1 (2011): 4–23. DOI: 10.1179/str.2011.58.1.001
7. Park, Seung Hyeon, Seung Jae Lee, and Sungwook Lee. "Experimental investigation of towing-and course-stability of a FPSO towed by a tug-boat with lateral motion." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 13 (2021): 12–23. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.11.003.
8. Baso, Suandar. "Experimental investigation of course stability on a barge during damaged conditions." *SINERGI* 26.2 (2022): 173–184. DOI: 10.22441/sinergi.2022.2.006.
9. Zan, U.I., H. Yasukawa, K. K. Koh, and A. Fitriadhy. "Model Experimental Study of a Towed Ship's Motion." *The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro*. Malaysia, 2012.
10. Yudin, Y.I., S. O. Petrov, and V. V. Kayan. "Modulation of towed vessel autooscillations process." *Operation of Maritime Transport* 2(72) (2013): 38–40.
11. Tanaka, M. "Experimental study on the course stability of a towed barge." *West Japan Society of Naval Architects Trans* 56 (1978): 38–46.
12. Zhukov, E. I., M. N. Libenzon, M. N. Pis'mennyi, A. N. Rvachev, and A. I. Shchetinina. *Upravlenie sudnom i ego tekhnicheskaya ekspluatatsiya*. Edited by A. I. Shchetinina. 3rd edition. M.: Transport, 1983.
13. ITTC Recommended procedures and guidelines. Web. 20 Sept. 2021 <https://itc.info/media/9876/0_0.pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Константин Михайлович —

старший преподаватель

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

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

ООО «Форсс технологии»

190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Бронницкая 44/117, лит. А, пом.1Н

e-mail: lotinskey@yandex.ru,

kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Яцук Юрий Владимирович —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

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

e-mail: YatsukUV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ushakov, Konstantin M. —

Senior lecturer

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

Forss Tekhnologii, Ltd.

44/117 Bronnitskaya Str., St. Petersburg, 190013,
Russian Federation

e-mail: lotinskey@yandex.ru,

kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Yatsuk, Yuri V. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: YatsukUV@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2023 г.

Received: October 10, 2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1076-1084

PROVIDING A CAVITATION-FREE REGIME WHEN FLUSHING SHIP PIPELINES WITH A TWO-PHASE MIXTURE

E. G. Lebedeva

Northern Arctic Federal University, Severodvinsk, Russian Federation

It is noted that during the flushing of ship systems and their elements, the mixed flow of water and air has proven itself well as a flushing medium. It has been experimentally established that there is a significant acceleration of the washing process and an increase in the number of flushed-out dirt particles. At the same time, the two-phase flushing method currently has a number of unsolved theoretical and practical problems. One of such tasks is to ensure a cavitation-free flushing regime. The issue of ensuring a cavitation-free regime when flushing ship pipelines with a two-phase mixture during the passage of narrownesses stream is considered in the paper. It is known that the cavitation occurrence depends on a number of factors. The degree of each factor influence on the probability of cavitation occurrence is investigated. In this paper, an attempt to theoretically assess the development of cavitation in narrow technological jumpers is made. The main theoretical dependence of the maximum permissible diameter of the jumper on the main parameters of the mixed flow, as well as on the initial pressure of the flushing flow is determined. The main parameters of the mixed flow are the mass flow rate of the flushing water, the densities of the mixture phases, the mass content of air in the flow, the initial diameter of the pipeline and the compression ratio of the jet in a narrow section. A homogeneous mixture model is used in the theoretical study of cavitation phenomena in a two-phase flow. The main design dependencies for determining the maximum allowable diameter of the jumper depending on the main factors of the two-phase flow are defined in the paper. The influence of various factors on the development of cavitation phenomena is evaluated. Particular attention is paid to the choice of the flow diameter of the technological jumper depending on the mass flow rate of the flushing stream, the air content and the initial pressure.

Keywords: cavitation, provision of a cavitation-free regime, two-phase flow, air content, flushing of ship pipelines.

For citation:

Lebedeva, Elena G. "Providing a cavitation-free regime when flushing ship pipelines with a two-phase mixture." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1076–1084. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1076-1084.

УДК 629.5

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСКАВИТАЦИОННОГО РЕЖИМА ПРИ ПРОМЫВКЕ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСЬЮ

Е. Г. Лебедева

Северный Арктический Федеральный Университет,
г. Северодвинск, Российская Федерация

Известно, что при проведении промывки судовых систем и их элементов хорошо зарекомендовал себя в качестве промывочной среды перемешанный поток воды и воздуха. Опытным путем установлено, что происходит значительное ускорение процесса промывки и увеличение количества вымываемых частиц загрязнений. При этом двухфазный метод промывки на данный момент имеет ряд нерешенных теоретических и практических задач, одной из которых является обеспечение бескавитационного режима промывки. В статье рассмотрен вопрос обеспечения бескавитационного режима при промывке судовых трубопроводов двухфазной смесью при прохождении потока узкостей. Известно, что возникновение кавитации

зависит от ряда факторов. Исследована степень влияния каждого фактора на вероятность возникновения кавитации. В данной работе выполнена попытка теоретической оценки развития кавитации в узких технологических перемычках. Определена основная теоретическая зависимость предельно допустимого диаметра перемычки от основных параметров смешанного потока: массового расхода промывочной воды, плотностей фаз смеси, массового содержания воздуха в потоке, исходного диаметра трубопровода и коэффициента поджатия струи в узком сечении, а также от исходного давления промывочного потока. При теоретическом исследовании кавитационных явлений в двухфазном потоке использована гомогенная модель смеси. В статье определены основные расчетные зависимости для определения предельно допустимого диаметра перемычки в зависимости от основных факторов двухфазного потока. Выполнена оценка влияния различных факторов на развитие кавитационных явлений. Особое внимание обращается на выбор проходного диаметра технологической перемычки в зависимости от массового расхода промывочного потока, содержания воздуха и исходного давления.

Ключевые слова: кавитация, обеспечение бескавитационного режима, двухфазный поток, воздуховодное содержание, промывка судовых трубопроводов.

Для цитирования:

Лебедева Е. Г. Обеспечение бескавитационного режима при промывке судовых трубопроводов двухфазной смесью / Е. Г. Лебедева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1076–1084. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1076-1084.

Введение (Introduction)

Повышение функциональной надежности элементов судовой энергетической установки, судового оборудования и обслуживающих систем в процессе эксплуатации зависят от степени чистоты рабочих жидкостей, которая в свою очередь зависит от чистоты внутренних полостей судовых трубопроводов, оборудования, механизмов и устройств. Перед заполнением систем рабочими жидкостями проводят комплекс мероприятий по обеспечению чистоты судовых систем, одним из которых является процесс технологической промывки внутренних полостей трубопроводов, исключающих судовое оборудование при помощи специально установленных перемычек.

Для промывки судовых трубопроводов могут применяться как стационарные устройства систем, так и переносные стенды [1]. С целью повышения качества и скорости проведения промывочных работ разветвленных судовых трубопроводов и оборудования предлагаются различные способы усовершенствования [2]. Одним из рассматриваемых случаев интенсификации является применение двухфазного потока. В процессе проведения опытных промывочных работ при помощи двухфазного потока на специально созданном испытательном стенде были получены хорошие результаты [3]. При наличии сведений о высокой результативности данного способа промывки путем создания стабильного двухфазного потока возникает ряд не рассмотренных ранее задач [4]. Сложность применения двухфазного потока на протяженных разветвленных трубопроводах состоит в неустойчивой структуре газожидкостной смеси. Существует опасность возникновения кавитационных явлений, оказывающих негативное влияние на стабильность потока и целостность элементов систем [5]. В двухфазных потоках происходит значительное уменьшение скорости распространения звука [6], что делает возможным появление других негативных процессов. Таким образом, одной из основных задач данного исследования является обеспечение бескавитационного процесса.

Технологическая промывка разветвленных трубопроводных систем выполняется с отключением участков, содержащих энергооборудование, устройства и т. д. Отключение данных участков производится при помощи технологических перемычек (переходников) путем перенаправления потока, минуя участки с оборудованием. По производственным причинам технологические перемычки могут иметь диаметры, отличные от диаметров промываемого трубопровода. Опасным моментом при использовании в качестве промываемой среды двухфазного потока является прохождение смеси воды и воздуха по участкам перемычек меньшего диаметра из-за значительного падения давления в узком участке и вероятного развития кавитационных явлений. На возникновение кавитационных процессов могут оказывать влияние скорость потока, содержание воздуха, давление и т. д. [7].

Следовательно, для предупреждения нежелательных явлений необходимо предотвратить развитие кавитации в узких перемычках.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Развитие кавитационных явлений зависит от многих факторов, в том числе от скорости потока смеси, содержания воздуха в промывочной смеси, исходного давления при промывке. Необходимо установить теоретическую зависимость момента наступления кавитации от данных факторов. Для этого примем соответствующую физическую модель двухфазного потока. Исследователи выделяют существование различных режимов двухфазных потоков [8]. При малом содержании воздуха в потоке воды при их движении по трубопроводам воспользуемся *гомогенной моделью* [9]. Благодаря данному предположению будем исходить из того, что скорости водной и воздушной фазы равны друг другу, т. е. пузырьки газа равномерно распределены по сечению канала. Схема движения потока смеси в технологической перемычке приведена на рис. 1.

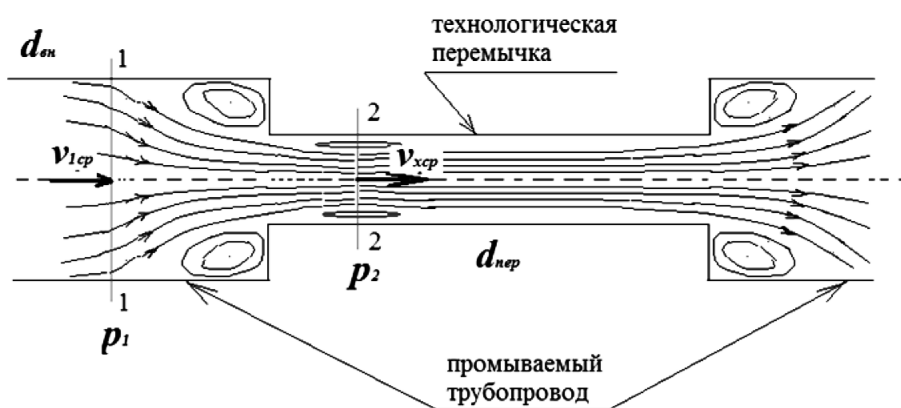


Рис. 1. Схема движения потока смеси в технологической перемычке:
 $d_{пер}$ — внутренний диаметр перемычки; $d_{вн}$ — внутренний диаметр промываемого трубопровода;
 v_{1cp}, p_1 — соответственно средняя скорость и давление смеси в сечении 1–1;
 $v_{хср}, p_2$ — средняя скорость и давление смеси в сечении 2–2

В сечении 1–1 поток смеси обладает скоростью v_{1cp} и давлением p_1 . Течение двухфазной смеси в технологической перемычке сопровождается поджатием потока в сечении 2–2, увеличением скорости смеси до $v_{хср}$ и падением давления до значения p_2 . Значение диаметра технологической перемычки $d_{пер}$ определяется из условия обеспечения антикавитационных условий в сечении 2–2. При падении давления в узком сечении 2–2 до давления насыщенных паров p произойдет развитие кавитации, что является нежелательным.

Для теоретического исследования процесса составим уравнение Бернулли для двух сечений: 1–1 и 2–2 (см. рис. 1):

$$\frac{p_1}{\rho_{см}} + \frac{v_{1cp}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_{см}} + \frac{v_{хср}^2}{2} + g\Delta h_{1-2}, \quad (1)$$

где $g\Delta h_{1-2}$ — потери энергии на внезапное сужение, имеющее размерность $м^2/с^2$.

Давление в сечении 2–2 должно оставаться выше $p_{нп}$, т. е. $p_2 > p_{нп}$. В сечении 2–2 поток суживается на величину, пропорциональную коэффициенту сжатия $\epsilon = \left(\frac{d_x}{d_{пер}}\right)^2$, т. е. скорость смеси

увеличивается по отношению к v_{2cp} — теоретической скорости смеси в перемычке $d_{пер}$.

Следовательно, скорость с учетом поджатия в сечении 2–2 определяется в виде

$$v_{хср} = \frac{v_{2cp}}{\epsilon}.$$

Величину μ принимают по справочникам гидравлических сопротивлений в зависимости от режима течения и остроты входных кромок.

Определим взаимосвязь скоростей потока смеси в сечениях 1-1 и 2-2 с массовым расходом $G_{\text{см}}$:

$$G_{\text{см}} = \rho_{\text{см}} v_{2\text{ср}} \frac{\Pi d_{\text{пер}}^2}{4} = \rho_{\text{см}} \epsilon v_{\text{хср}} \frac{\Pi d_{\text{пер}}^2}{4};$$

$$G_{\text{см}} = G'' + G' = \rho' Q' + \rho'' Q'' = \rho_{\text{см}} v_{1\text{ср}} \frac{\Pi d_{\text{вн}}^2}{4}.$$

В данных формулах массовый расход смеси определяется с учетом подачи воды и воздуха, образующего смесь:

$$G_{\text{см}} = G'' + G' = \rho' Q' + \rho'' Q'',$$

где G' и G'' — массовые расходы воды и воздуха в кг/с;

$G_{\text{см}}$ — массовый расход смеси в кг/с;

$\rho_{\text{см}}$ — объемная плотность смеси кг/м³, которую можно определить, зная исходные плотности газовой (воздушной) и жидкой (водяной) фазы ρ'' и ρ' , соответственно, по формуле [9]:

$$\rho_{\text{см}} = (\rho'' \phi + \rho'(1 - \phi)).$$

Здесь ϕ — объемное воздухосодержание, устанавливаемое через объемные расходы воды Q' и воздуха Q'' , по формуле

$$\phi = \frac{Q''}{Q_{\text{см}}} = \frac{Q''}{Q' + Q''}.$$

Получим выражения для скоростей смеси в обоих сечениях соответственно:

$$v_{1\text{ср}} = \frac{4G_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}} \Pi d_{\text{вн}}^2}; \quad (2)$$

$$v_{\text{хср}} = \frac{4G_{\text{см}}}{\epsilon \rho_{\text{см}} \Pi d_{\text{пер}}^2}. \quad (3)$$

Потери энергии $g\Delta h_{1-2}$ затрачиваются на внезапное сужение потока и определяются по известной справочной формуле [10] для потока воды расходом $G_{\text{см}}$:

$$g\Delta h_{1-2} = \frac{0,5}{\epsilon^2} \left(1 - \frac{d_{\text{пер}}^2}{d_{\text{вн}}^2} \right) \frac{v_{2\text{ср}}^2}{2}. \quad (4)$$

При этом скорость $v_{2\text{ср}}$ определяется для смеси с учетом поджатия ϵ :

$$v_{2\text{ср}} = \frac{4G_{\text{см}}}{\rho' \Pi d_{\text{пер}}^2}. \quad (5)$$

Подставив полученные выражения в уравнение Бернулли (1), получим с учетом скоростей, определенных по (2), (3), (5) и потерь энергии (4):

$$2 \left(\frac{p_1}{\rho_{\text{см}}} - \frac{p_2}{\rho_{\text{см}}} \right) = \left(\frac{4G_{\text{см}}}{\epsilon \rho_{\text{см}} \Pi d_{\text{пер}}^2} \right)^2 - \left(\frac{4G_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}} \Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2 + \frac{0,5}{\epsilon^2} \left(1 - \frac{d_{\text{пер}}^2}{d_{\text{вн}}^2} \right) \left(\frac{4G_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}} \Pi d_{\text{пер}}^2} \right)^2.$$

После преобразования получим

$$2(p_1 - p_2)\rho_{\text{см}} = \left(\frac{4G_{\text{см}}}{\epsilon \Pi d_{\text{пер}}^2} \right)^2 - \left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2 + \frac{0,5}{\epsilon^2} \left(1 - \frac{d_{\text{пер}}^2}{d_{\text{вн}}^2} \right) \left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{пер}}^2} \right)^2.$$

Установим зависимость $d_{\text{пер}}$ от содержания воздуха в смеси воды и воздуха. Для этого введем обозначение

$$x = \left(\frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{пер}}} \right)^2.$$

Получим квадратное уравнение относительно x :

$$1,5x^2 + (-0,5)x - \epsilon^2 \left(2\rho_{\text{см}} \frac{p_1 - p_2}{\left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right) = 0;$$

$$x^2 + \left(-\frac{1}{3} \right)x - \frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2\rho_{\text{см}} \frac{(p_1 - p_2)}{\left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right) = 0.$$

В данном уравнении введем следующие обозначения:

$$a = 1; \quad b = -\frac{1}{3}; \quad c = -\frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2 \frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right).$$

При решении квадратного уравнения необходимо вычислить дискриминант:

$$D = b^2 - 4ac = \frac{1}{9} + 4 \frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2 \frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right).$$

Квадратное уравнение будет иметь решения при положительном значении дискриминанта D . В результате получим два корня, один из которых отрицательный, поэтому не является решением задачи, в отличие от второго — положительного:

$$E = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{1}{9} + 4 \frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2 \frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right)}}{2}.$$

После преобразований получим для диаметра перемычки:

$$d_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{2}d_{\text{вн}}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{9} + 4\frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2\frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left(\frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2}\right)^2} + 1 \right)}}.$$

Последнюю формулу для удобства расчетов можно представить в зависимости от содержания воздуха k , используя выражение для массового содержания воздуха, приведенное в статье [11]:

$$k = \frac{G''}{G_{\text{см}}}.$$

Массовый расход смеси $G_{\text{см}}$ можно выразить через массовый расход промывочной воды:

$$G_{\text{см}} = \frac{G'}{(1-k)}.$$

Тогда выражение для $d_{\text{пер}}$ можно переписать в виде

$$d_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{2}d_{\text{вн}}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{9} + 4\frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2\frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left(\frac{4G'}{(1-k)\Pi d_{\text{вн}}^2}\right)^2} + 1 \right)}}.$$

Значение давления p_2 в сечении 2–2 может снизиться до критического значения, которое станет равным давлению насыщенного пара при заданной температуре $p_2 = p_{\text{нп}}$:

$$d_{\text{пер.кр}} = \frac{\sqrt{2}d_{\text{вн}}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{9} + 4\frac{\epsilon^2}{1,5} \left(2\frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_{\text{нп}})}{\left(\frac{4G'}{(1-k)\Pi d_{\text{вн}}^2}\right)^2} + 1 \right)}}.$$

Таким образом, вероятность возникновения кавитационных явлений при протекании потока смеси в технологических переключках определяется в зависимости от массового содержания воздуха k в потоке двухфазной смеси, массового расхода воды G' , давления насыщенных паров $p_{\text{нп}}$, давления потока при промывке p_1 и исходного внутреннего диаметра промываемого трубопровода $d_{\text{вн}}$.

Результаты (Results)

Давление насыщенных паров, согласно справочным данным [12], при технологической промывке систем, выполняемой при температуре 40 °С, составляет $p_2 = p_{\text{нп}} = 7,37$ кПа. Для исходного диаметра трубопровода $d_{\text{вн}}$ и определенного содержания воздуха k минимальный критический диаметр переходника $d_{\text{пер.кр}}$ определен в табл. 1 и 2 для различных диаметров промываемого трубопровода $d_{\text{вн}}$, исходного давления p_1 и воздухоносности k .

Расчеты, представленные в табл. 1, выполнены для значения $p_1 = 0,5$ МПа и различных массовых расходах промывочной воды G' . В зависимости от исходного давления p_1 определялось значение плотности воздушной фазы $\rho'' = 6,42$ кг/м³. Минимальное значение коэффициента по справочнику [9] $\epsilon = 0,53$.

Таблица 1

Значения минимально допустимого диаметра переходника $d_{\text{пер}}$ из условия обеспечения антикавитационной работы в зависимости от содержания воздуха k

Массовое содержание воздуха $k = \frac{G''}{G_{\text{см}}}$	0	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008
Объемное содержание воздуха $\varphi = \frac{Q''}{Q_{\text{см}}}$	0	0,015	0,030	0,045	0,059	0,072	0,085	0,098	0,111
Внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}} = 75$ мм									
Критический диаметр переходника $d_{\text{пер.кр}}$, мм	$G' = 13,5$ кг/с	35	35	35	35	36	36	36	36
	$G' = 23$ кг/с	45	45	46	48	50	52	53	57
Внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}} = 100$ мм									
Критический диаметр переходника $d_{\text{пер.кр}}$, мм	$G' = 20$ кг/с	43	43	43	43	43	44	44	44
	$G' = 25$ кг/с	48	48	48	48	48	49	49	49
Внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}} = 125$ мм									
Критический диаметр переходника $d_{\text{пер.кр}}$, мм	$G' = 23$ кг/с	46	46	46	46	47	47	47	47
	$G' = 27$ кг/с	50	50	50	50	50	51	51	51
	$G' = 37$ кг/с	58	58	58	59	59	59	59	60

Анализ данных табл. 1 показывает, что минимально допустимый диаметр переходника в основном зависит от массового расхода воды (средней скорости воды), массового содержания воздуха и давления p_1 . Интерес представляет также зависимость минимально допустимого диаметра переходника от давления p_1 . Промывка систем может выполняться при различных давлениях исходя из технологических возможностей, поэтому проанализируем изменение $d_{\text{пер.кр}}$ от давления p_1 .

Таблица 2

Значения минимально допустимого диаметра переходника $d_{\text{пер}}$ из условия обеспечения антикавитационной работы в зависимости от давления в промывочном потоке p_1

Содержание воздуха $k = 0,0002$							
Давление p_1 , кПа	200	250	300	350	400	450	500
Внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}} = 100$ мм							
Критический диаметр переходника, $d_{\text{пер.кр}}$, мм	58	55	52	50	49	47	46

Таким образом, чем меньше исходное рабочее давление промывки p_1 непосредственно перед перемычкой, тем больше требуется диаметр перемычки, определяемый из условия антикавитационной работы $p_2 > p_{\text{нп}}$.

Обсуждение (Discussion)

В работе представлен способ теоретического определения бескавитационного режима работы смешанного двухфазного потока в узких технологических перемычках при проведении промывки судовых систем. Полученная теоретическая зависимость позволяет выполнять проверочные расчеты применительно к различным производственным условиям, возникающим в цеховых и доковых условиях при промывке систем двухфазным и однофазным потоком.

Возможность теоретического расчета различных режимов промывки может осуществляться при варьировании имеющихся данных, исходя из «внешних» задач: расхода воды, содержания воздуха, исходного давления в трубопроводах разного диаметра. Это позволяет применять данную формулу в качестве расчетной для определения ограничивающих факторов при проведении очистки внутренних полостей трубопроводов с использованием как однофазной, так и двухфазной промывки.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе предложена теоретическая зависимость, определяющая предельно допустимые диаметры технологических перемычек, применяющихся в процессе промывки судовых разветвленных трубопроводных систем, из условия их бескавитационной работы.
2. Данная теоретическая зависимость может применяться в различных промывочных режимах: расходах воды, содержании воздуха, напоре промывочного насоса.
3. Рассмотренная теоретическая зависимость также может использоваться для обеспечения бескавитационного режима при традиционной гидродинамической промывке систем однофазным потоком воды.
4. Исследуемая теоретическая зависимость может применяться в производственных условиях применительно к промывке различных систем, имеющих переменные сечения трубопроводов.
5. Диаметры технологических переходников, применяемые в качестве перемычек, соединяющих различные участки систем и исключающих оборудование, во избежание развития кавитационных процессов, следует выбирать с увеличением с учетом запаса на поджатие потока в сечении 2–2 и входного давления p_1 и устанавливать в диапазоне $d_{\text{пер.кр}} < d_{\text{пер}} < d_{\text{вн}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Н. В. Испытания и промывка систем гидравлики с применением переносных стендов / Н. В. Петров, Н. В. Розов // Судостроение. — 2018. — № 4 (837). — С. 39–41.
2. Соловьев Б. В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений / Б. В. Соловьев. — Л.: Судостроение, 1977. — 75 с.
3. Канаев Д. Н. Новые средства технологического оснащения для промывки судовых водяных систем и оборудования / Д. Н. Канаев, П. Л. Лямин, Е. Г. Лебедева, Н. И. Александров // Международный научно-исследовательский журнал. — 2014. — № 2–1 (21). — С. 93–95.
4. Лебедева Е. Г. Интенсификация технологии промывки судовых систем пульсирующим двухфазным потоком: дис. ... канд. техн. наук / Е. Г. Лебедева. — СПб.: ГУВК, 2012. — 169 с.
5. Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрьгин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 705–717. 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
6. Вилка Чаича М. Б. О скорости звука в двухфазной и двухкомпонентной среде / М. Б. Вилка Чаича, С. Юнусова, Г. Н. Шикин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. — 2011. — № 2. — С. 161–164.
7. Перник А. Д. Проблемы кавитации / А. Д. Перник. — Л.: Судостроение, 1966. — 439 с.
8. Дейч М. Е. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 327 с.
9. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллес. — М.: Мир, 1972. — 440 с.

10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
11. Лебедева Е. Г. Определение средней скорости двухфазной смеси, обеспечивающей промывку судовых систем, в зависимости от содержания воздуха в потоке / Е. Г. Лебедева // Судостроение. — 2023. — № 3 (868). — С. 39–42.
12. Бабичев А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев [и др.]; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

REFERENCES

1. Petrov, N. V., and N. V. Rozov. “Tests and flushing of hydraulic systems with the use of portable stands.” *Shipbuilding* 4(837) (2018): 39–41.
2. Solov'ev, B. V. *Ochistka sudovykh sistem ot tekhnologicheskikh zagryaznenii*. L.: Sudostroenie, 1977.
3. Kanaev, D. N., P. L. Lyamin, E. G. Lebedeva, and N. I. Alexandrov. “New technological facilities for flushing of ship-borne water systems and equipment.” *International Research Journal* 2–1(21) (2014): 93–95.
4. Lebedeva, E. G. *Intensifikatsiya tekhnologii promyvki sudovykh sistem pul'siruyushchim dvukhfaznym potokom*. PhD diss. SPb., 2012.
5. Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. “Studying the cavitation process and the possibility of reducing erosive wear.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.4 (2019): 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
6. Wilka Chaicha, M.B., S. Yunusova, and G. N. Shikin. “On sound velocity in two-phase and two-component medium.” *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science* 2 (2011): 161–164.
7. Pernik, A. D. *Problemy kavitatsii*. L.: Sudostroenie, 1966.
8. Deich, M. E., and G. A. Filippov. *Dvukhfaznye techeniya v elementakh teploenergeticheskogo oborudovaniya*. M.: Energoatomizdat, 1987.
9. Wallis, Graham B. *One-Dimensional Two-Phase Flow*. First Edition. McGraw-Hill, 1969.
10. Idel'chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. M.: Mashinostroenie, 1992.
11. Lebedeva, E. G. “Defining average speed of two-phase mixture for flushing the shipboard systems depending on air content in the flow.” *Shipbuilding* 3(868) (2023): 39–42.
12. Babichev, A. P., N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskii, et al. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* Edited by I. S. Grigor'ev, and E. Z. Meilikhov. M.: Energoatomizdat, 1991.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лебедева Елена Геннадьевна —
кандидат технических наук, доцент
Северный Арктический федеральный университет
164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,
ул. Капитана Воронина, 6
e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lebedeva, Elena G. —
PhD, associate professor
Northern Arctic Federal University
6 Kapitan Voronin Str., Severodvinsk, 164500,
Russian Federation
e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1085-1095

SYNTHESIS OF SHIP SYSTEMS OPTIMAL REGULATORS BASED ON MATRIX INEQUALITIES

S. O. Baryshnikov, N. M. Vikhrov, V. V. Sakharov

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

The output and state regulators synthesis for ship control systems based on linear matrix inequalities using the CVX software package for solving optimization problems by the method of semi-definite programming is considered. Estimates parameters for regulators providing asymptotically stable systems regimes on Lyapunov inequalities solutions sets are obtained. An algorithm for controlling the ship course using a robust regulator in state feedback, followed by the use of CVX technologies to implement the minimum energy consumption control algorithm, is presented. The control vector estimation is reduced to the minimization of the L2 norm and it is performed in two stages, namely, the best mode is first determined, and then the mode under constraints is defined. The use of Lyapunov inequalities with the calculations implementation in CVX format on proprietary solvers has allowed us to obtain compact program texts and expand the set of restrictions introduced. In the algorithm for solving the boundary value problem of controlling a discrete model of an object, in contrast to existing optimization methods, a mode of transfer from the initial state to the final one with the right boundary, not necessarily equal to zero, is implemented. For a class of observable and controllable time-invariant systems, using the Krylov's function contained in the MATLAB gallery of functions, L2-norms to be minimized are formed. Examples of regulator calculations with a given degree of stability and optimal systems, confirming proposed solutions correctness, are given.

Keywords: vessel, regulators, linear matrix inequalities, solvers, norms, boundary value problem, Krylov subspaces, minimum energy consumption, degree of stability, constraints.

For citation:

Baryshnikov, Sergey O., Nikolai M. Vikhrov, and Vladimir V. Sakharov. "Synthesis of ship systems optimal regulators based on matrix inequalities." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1085–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1085-1095.

УДК 621.398.04

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ НЕРАВЕНСТВ

С. О. Барышников, Н. М. Вихров, В. В. Сахаров

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

Рассмотрен способ синтеза регуляторов выхода и состояния судовых систем управления на основе линейных матричных неравенств с применением программного пакета CVX для решения задач оптимизации методом полуопределенного программирования. Получены оценки параметров регуляторов, обеспечивающих асимптотически устойчивые режимы систем на множествах решений неравенств Ляпунова. Приведен алгоритм управления курсом судна с помощью робастного регулятора в обратной связи по состоянию с последующим применением CVX-технологий для реализации алгоритма минимального по расходу энергии управления. Оценка вектора управления приведена к минимизации L_2 -нормы и выполнена в два этапа: сначала определен наилучший режим, затем — режим в условиях ограничений. Применение неравенств Ляпунова с реализацией вычислений в формате CVX на собственных решателях позволило получить компактные

тексты программ и расширить множество вводимых ограничений. В алгоритме решения краевой задачи управления дискретной моделью объекта, в отличие от существующих способов оптимизации, реализован режим перевода из начального состояния в конечное с правой границей, не обязательно равной нулю. Для класса наблюдаемых и управляемых инвариантных во времени систем с помощью функции А. Н. Крылова, содержащейся в галерее функций MATLAB, сформированы L_2 -нормы, подлежащие минимизации. Приведены примеры расчетов регуляторов с заданной степенью устойчивости и оптимальных систем, подтверждающие корректность предложенных решений.

Ключевые слова: судно, регуляторы, линейные матричные неравенства, решатели, нормы, краевая задача, подпространства Крылова, минимальный расход энергии, степень устойчивости, ограничения.

Для цитирования:

Барышников С. О. Синтез оптимальных регуляторов судовых систем на основе матричных неравенств / С. О. Барышников, Н. М. Вихров, В. В. Сахаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1085–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1085-1095.

Введение (Introduction)

Повышение эффективности и качества функционирования систем автоматизации технологических процессов на водном транспорте является важной эксплуатационной задачей, решение которой с применением новых принципов анализа и синтеза оптимальных регуляторов на судах позволит значительно улучшить их поведение в статических и динамических режимах, обеспечить экономию топлива и энергии при заданных показателях устойчивости [1]. Важным и удобным математическим аппаратом для достижения поставленной цели является техника линейных матричных неравенств, решение которых позволяют охватить многие задачи синтеза оптимальных систем на множествах альтернативных вариантов регуляторов выхода и состояния [2]. Приведение билинейных систем матричных неравенств к линейным хорошо коррелируется с численными методами оптимизации в CVX-формате, что значительно упрощает процесс разработки программ в кодах MATLAB и сокращает время проведения машинного эксперимента [3].

Для управления системой с регулятором в обратной связи воспользуемся инвариантной во времени (LTI) моделью в пространстве состояний [4]:

$$\dot{x} = Ax + Bu;$$

$$y = Cx + Du;$$

$$u = -Ky,$$

где матрицы $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{k \times n}$, $D \in R^{k \times m}$. Матрица статического регулятора $K \in R^{m \times n}$.

Если $D = 0$, то целью управления будем полагать расчет оптимального регулятора K , обеспечивающего асимптотическую устойчивость системы с обратной связью с матрицей состояния

$$A_c = A - BKC.$$

Условие асимптотической устойчивости определим с помощью матричного неравенства

$$(A_c^T P + P A_c) < 0, P > 0, \quad (1)$$

где A_c — матрица состояния системы с регулятором;

P — симметричная матрица Ляпунова.

Существование решения соответствует гурвицевой матрице A_c . Примененные обозначения неравенств использованы для оценки знакоопределенности матриц [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Техника линейных матричных неравенств LMI (Linear Matrix Inequalities) получила необычайно широкое распространение в моделировании динамических систем и в настоящее время стала рабочим инструментом в теории управления [6]. По определению принципиальным свойством линейных матричных неравенств является выпуклость множества его решений [7]. Это позволяет формулировать многие задачи оптимального управления в виде задач выпуклого программиро-

вания [8]. В формате LMI исследуют вопросы асимптотической устойчивости систем путем решения матричного неравенства (1), применяя для моделирования новые интерфейсы с решателями в среде MATLAB, в частности пакеты инструментов CVX [9]. Чтобы получить регулятор K с управлением по вектору выхода y , преобразуем (1) к следующему виду:

$$(A - BKC)^T P + P(A - BKC) < 0, P > 0. \quad (2)$$

В системе (2) переменными являются матрицы P и K . Наличие их произведения в составе неравенства Ляпунова позволяет отнести эту систему к классу билинейных неравенств.

Если в модели динамической системы принять $C = I$, то из условий (2) получим неравенства с регулятором по переменным состояниям:

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) < 0, P > 0, \quad (3)$$

и для обеспечения устойчивости потребуется определить K и P .

Поскольку (3) — билинейное матричное неравенство относительно K и P , необходимо привести его к линейному, для чего введем обозначения [10]:

$$S = P^{-1} \text{ и } Z = KS.$$

Получим структуру LMI:

$$SA^T + AS - Z^T B^T - BZV < 0, S > 0. \quad (4)$$

Рассчитываемые матрицы оценим путем обратных преобразований:

$$P = S^{-1} \text{ и } K = ZP,$$

которые возможны, поскольку P — симметричная матрица, не равная нулю.

Аналогично определим систему матричных неравенств для расчета регулятора выхода, используя билинейное неравенство

$$A^T P + PA - C^T K^T B^T P - PBKC < 0, P > 0. \quad (5)$$

С этой целью введем такую матрицу M , чтобы выполнялись равенства: $BM = PB$ и $N = MK$. Тогда неравенство (5) можно привести к формату LMI следующего вида:

$$A^T P + PA - C^T N^T B^T - BNC < 0, BM = PB, P > 0. \quad (6)$$

В системе (6) компоненты с положительными знаками линейны по P , а с отрицательными — по N . Решение этой системы позволяет получить оценку матрицы M , которую можно инвертировать. Поэтому регулятор выхода

$$K = M^{-1}N. \quad (7)$$

Полученные линейные неравенства (4) и (6) формируют структуру расчета регуляторов замкнутых инвариантных во времени LTI-систем, управляемых по векторам состояния и выхода. Отметим также, что критерии оценки динамических свойств управляемых систем при решении линейных матричных неравенств могут отличаться от традиционно используемых в системах управления [11]. Например, в процессе расчета принято задавать требуемую степень устойчивости числом a , большим нуля, которую должен обеспечить синтезируемый регулятор.

Количественно степень устойчивости $a > 0$ представляет собой для гурвицевой матрицы A расстояние на комплексной плоскости от начала координат до точки на оси абсцисс, где расположено собственное число спектра матрицы замкнутой системы с максимальной действительной частью. Решение LMI должно гарантировать, что по модулю действительная часть этого числа либо действительные части комплексно-сопряженных корней должны быть больше или равны заданной степени устойчивости [12]. Для надежности (робастности) решения в неравенство (6) вводится скалярная величина $a > 0$ в состав аддитивной составляющей матрицы Ляпунова следующего вида: $2aP$.

Задача состоит в нахождении такого регулятора K , который обеспечивает экспоненциальную устойчивость со степенью устойчивости, не меньшей a . В результате сформирована структура

$$A^T P + PA + 2aP - C^T N^T B^T - BNC < 0, BM = PB, P > 0, \quad (8)$$

пригодная для решения широкого класса задач оптимизации на выпуклых множествах численными методами. Согласно (4), синтез регулятора состояния выполним с помощью решения LMI-системы:

$$AS + SA^T + 2aS - BZ - Z^T B^T < 0, S > 0. \quad (9)$$

Регулятор получен по уравнениям $P = S^{-1}$ и $K = ZP$.

Рассмотрим режим работы LTI-системы с квадратичным критерием качества $J = x_0^T S^{-1} x_0 \leq gam$. Регулятор $K = ZP$ такой системы должен гарантировать выполнение условия $J \leq gam$ при начальном условии $x(0) = x_0$. Тогда неравенства для синтеза регулятора будут иметь вид:

$$AS + SA^T + 2aS - BZ - Z^T B^T < 0, S > 0; \quad \begin{bmatrix} gam & x_0^T \\ x_0 & S \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} S & Z^T \\ Z & gam \end{bmatrix} > 0, \quad (10)$$

где блочные матричные неравенства представляют собой дополнение Шура и эллипсоид, внутри которого располагается gam . Синтез регулятора выполним путем решения (10) при минимальном значении gam в кодах CVX по заданной степени устойчивости a и известному вектору начальных условий $x(0)$.

Для решения линейно-квадратичных задач управления дискретными системами целесообразно применять технику, использующую аппарат линейных матричных неравенств совместно с CVX-способами оценки норм погрешности вычислений (Convex Optimization Library) средствами MATLAB. При этом минимум нормы:

$$\|Ax - b\|^2 \text{ при ограничении } lb \leq x \leq ub, \quad (11)$$

удобно оценивать в терминах функций CVX по простому текстовому алгоритму:

```
cvx_begin
variable x(n)
minimize (norm(A*x-b,2))
subject to
lb <= x <= ub
cvx_end
```

Здесь операторы первой и последней строк формируют цикловой процесс, а также определяют его начало и завершение. Операторами определяется область текстового заполнения (в кодах вычислительной среды) условий задачи оптимизации с учетом специфики. Во второй строке объявлен вектор искомой переменной, состоящий из n элементов, в третьей — приведен критерий оптимизации. Далее следуют ограничения на $x(n)$ с указанием нижней lb и верхней ub границ.

Специфика формата CVX состоит в том, что при запуске программы средствами MATLAB сначала проверяется корректность введенных в цикл операций, устанавливается принадлежность неравенств к классу аффинных задач, а затем выполняются вычисления решателями пакета CVX, сформированными из функций среды. Если в строке *minimization* критерием является евклидова норма (11), то решение эквивалентно минимизации, выполненной с помощью квадратичного программирования. При отсутствии ограничений результат вычислений совпадает с оценками $\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b$ либо $\hat{x} = A \setminus b$ — операцией левого деления, которые предпочтительно использовать для мониторинга вычислений.

Важное свойство алгоритма в формате CVX, кроме краткой записи скрипт-файлов и файлов-функций в среде MATLAB, состоит в возможности работы с различными нормами, переход к которым выполняется заданием числа k по схеме

$$\text{minimize } (\text{norm}(A*x-b, k)).$$

В системах управления наиболее часто используют нормы со значениями $k = 1, 2, \text{Inf}$. Для ввода нормы Фробениуса применяют термин «fro». Нормы векторов в формате $\text{norm}(X, p)$ оценивают по формуле

$$N = (\sum_1^m \|V_i\|^p)^{1/p}. \quad (12)$$

Альтернативным вариантом решения задачи наименьших квадратов является использование способов минимизации $\|Ax - b\|_1$ и $\|Ax - b\|_\infty$, обеспечивающих минимум нормы Чебышева. С ними связан класс задач выпуклой оптимизации, решаемых методом линейного программирования, переход к которому с применением функции *linprog* выполняется переформатированием исходных данных в формате CVX [14]. Поскольку указанные нормы (12) являются частью базовой библиотеки функций CVX, в этом пакете можно эффективно решать проблемы численной оптимизации с широким спектром вводимых ограничений.

Существуют также другие нормы, не являющиеся частью стандартного дистрибутива MATLAB, которые в формате CVX доступны как обычные функции для вычислений. Список поддерживаемых нелинейных функций в CVX выходит далеко за рамки норм, что позволило получить в работе простые структуры и применить численные алгоритмы оптимизации для управления динамическими объектами с высокой чувствительностью к изменениям параметров и ограничениям.

Результаты (Results)

На первом этапе выполним синтез системы управления курсом судна с применением линейных матричных неравенств. Предложим, что танкерный флот (нефтеналивные суда, газовозы, химовозы, бункеровщики и др.), совершающие обратные балластные или порожние переходы, а также морские и речные суда, работающие на закрепленных грузовых линиях, эксплуатируют, как правило, на двух основных (квазистационарных) режимах: в грузу и балласте. Специфика управления судном на двух рабочих режимах состоит в том, что структура его математической модели не изменяется, а матричные коэффициенты объекта автоматизации сохраняются постоянными на каждом из двух режимов. Тогда исходя из опыта эксплуатации авторулевых, коэффициенты регулятора выхода (состояния) на каждом режиме при моделировании можно полагать постоянными для каждой из двух динамических моделей. Чтобы обеспечить требования устойчивости и свойства робастности системы управления курсом судна, параметры регулятора следует автоматически корректировать во время рейса, для чего целесообразно использовать технику линейных матричных неравенств.

Рассмотрим судно, модель которого представлена матричными уравнениями в пространстве состояний для двух режимов:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u(t), \quad i = 1, 2; \\ y_i(t) &= C_i x_i(t) + D_i u_i(t), \end{aligned} \quad (13)$$

где, $x_i(t) \in R^n$ — вектор состояния и $u_i(t) \in R$ — управление $A_i \in R^{n \times n}$ и $B_i \in R^{n \times m}$ не изменяемое во времени.

Система (13) полностью управляема для двух режимов. Примем значения $C_i = I$ и $D_i = 0$. Тогда синтез регуляторов состояния можно выполнить, последовательно применив LMI-систему (9): $AS + SA^T + 2aS - BZ - Z^T B^T < 0$ ($S > 0$) и уравнения $P = S^{-1}$, $K = ZP$ для заданной степени устойчивости.

Рассмотрим модель судна, работающего на закрепленной линии. Уравнения динамики в грузу и балласте представим в виде двух систем с матрицами [1]:

– в грузу:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.298 & -0.279 & 0 \\ -4.370 & -0.773 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = [0.116 \quad -0.773 \quad 0]^T;$$

– в балласте:

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.428 & -0.339 & 0 \\ -2.939 & -1.011 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = [0.150 \quad -1.011 \quad 0]^T.$$

Здесь $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$ — вектор состояния,

где $x_1(t) = \beta(t)$ — угол дрейфа модели судна;

$x_2(t) = \omega(t)$ — угловая скорость по курсу;

$x_3(t) = \varphi(t)$ — курсовой угол;

$u(t) = \delta(t)$ — угол перекладки руля [9].

Перевод модели судна в LTI-формат для вычислений в кодах MATLAB выполним оператором `ss: sys = ss(A, B, C, D)`.

Приведем фрагмент решения с применением линейного матричного неравенства (9) и функций CVX по текстовому алгоритму с решателем *sdp* задач полуопределенного программирования:

```
cvx_begin sdp
a=0.25;
eps=0.0001;
% Размерность переменных
variable S(3,3) symmetric
variable Z(1,3)
% Линейное матричное неравенство с извлечением матриц из объекта sys:
sys.A*S + S*sys.A' + 2*a*S + sys.B*Z + Z'*sys.B' <= -eps*eye(3)
S >= eps*eye(3)
cvx_end
P=inv(S); K = Z*P
```

На рис. 1 приведены переходные процессы, полученные для модели в грузу и балласте с регуляторами, обеспечивающими степени устойчивости 0,25 и 1,0. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов для модели судна в грузу и балласте

Модель судна в грузу			
a	Регулятор K	Спектр матрицы A_c	$A_c = A - BK$
0.25	$[-5.8911 \quad 0.8768 \quad 2.3383]$	$-0.9208 + 0.0000i$ $-0.7556 + 1.1407i$ $-0.7556 - 1.1407i$	$-0.9814 \quad -0.1773 \quad 0.2712$ $0.1839 \quad -1.4507 \quad -1.8075$ $0 \quad 1.0000 \quad 0$
1.0	$[-2.5773 \quad 7.0648 \quad 17.4661]$	$-1.0259 + 0.0000i$ $-2.9026 + 2.0317i$ $-2.9026 - 2.0317i$	$-0.5970 \quad 0.5405 \quad 2.0261$ $-2.3777 \quad -6.2341 \quad -13.5013$ $0 \quad 1.0000 \quad 0$
Модель судна в балласте			
a	Регулятор K	Спектр матрицы A_c	$A_c = A - BK$
0.25	$[-3.1821 \quad 0.4196 \quad 1.8039]$	$-0.8014 + 0.0000i$ $-0.7696 + 1.1723i$ $-0.7696 - 1.1723i$	$-0.9053 \quad -0.2761 \quad 0.2706$ $0.2781 \quad -1.4352 \quad -1.8237$ $0 \quad 1.0000 \quad 0$
1.0	$[4.9365 \quad 7.3432 \quad 22.2757]$	$-1.0524 + 0.0000i$ $-3.5351 + 2.4484i$ $-3.5351 - 2.4484i$	$0.3125 \quad 0.7625 \quad 3.3414$ $-7.9298 \quad -8.4349 \quad -22.5207$ $0 \quad 1.0000 \quad 0$

Результаты расчетов свидетельствуют о возрастании требований к регуляторам с увеличением степени устойчивости. При отсутствии ограничений на управление и переменные состояния техника LMI позволяет конструировать регуляторы, обеспечивающие запас устойчивости,

больший заданного, что гарантирует надежность работы системы. Например, при заданном $a = 0,25$ для судна в грузу обеспечивается $a_c = 0.7556$, в балласте эта величина составляет $a_{\text{бал}} = 0.7696$. С увеличением требований к устойчивости и назначении $a = 1.0$ уменьшается время переходного процесса, возрастают нагрузки на элементы системы, на это расходуется энергия. В результате предлагаются регуляторы для более жесткого режима с гарантированными оценками $a_c = 1.0259$ и $a_{\text{бал}} = 1.0524$, близкими к единице. Очевидно, при дальнейшем повышении требований к устойчивости режимы в рамках LMI могут быть не реализованы.

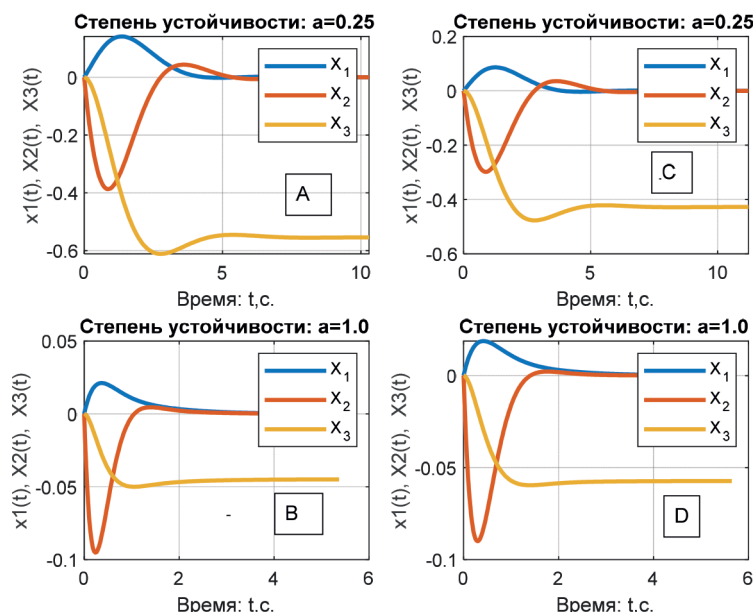


Рис. 1. Переходные процессы в модели судна:
A и B — в грузу; C и D — в балласте

Введем параметр gam , ограничивающий критерий качества $J = x_0^T S^{-1} \leq gam$. Используя линейные матричные неравенства (10), определим минимум скалярной переменной $gam_{\min}$, что позволит получить оценку наименьшего по энергии (в рамках критерия J) управления, реализуемого регулятором K . При введенном ограничении $gam = gam(a)$ система не будет работать, если задать режим $a_1 > a$.

Синтез регулятора K системы управления с ограничением $gam_{\min}$ выполнен методом выпуклого программирования в CVX-формате. Результаты вычислений для пяти значений степени устойчивости представлены построчно в табл. 2. На всех режимах поддерживался вектор начальных условий $x_0 = [0.1 \ -0.1 \ 0.3]^T$.

Таблица 2

Результаты вычислений для пяти значений степени устойчивости

Модель судна в грузу				
a	a_c	Регулятор K	$J_{\min} = x_0^T \cdot S^{-1} \cdot x_0$	$gam_{\min}$
0.25	0.2512	$[-3.6021 \ 0.8778 \ 0.2371]$	0.3832	0.3832
0.50	0.5031	$[-4.7707 \ 1.3537 \ 0.6334]$	0.6256	0.6256
0.75	0.7513	$[-4.7815 \ 1.9940 \ 1.6959]$	1.5150	1.5150
1.0	1.0024	$[-4.0607 \ 2.7477 \ 3.2007]$	2.7287	2.7287
1.25	1.2527	$[-2.6067 \ 3.6143 \ 5.1368]$	4.2687	4.2687

Приведем фрагмент программы поиска $gam_{\min}$, содержащей линейные матричные неравенства (10):

```

cvx_begin sdp
variable S(3,3) symmetric
variable Z(1,3)
variable gam
minimize gam
A*S + S*A' + 2*a*S + B*Z + Z'*B' <= -eps*eye(3)
S >= eps*eye(3)
[gam x0'; x0 S] >= 0
[S Z'; Z gam] >= 0
cvx_end

```

На втором этапе выполним оптимальное управление дискретной системой с применением матрицы А. Н. Крылова путем минимизации евклидовой нормы в CVX-формате. Определение оптимального управления дискретной динамической моделью основано на минимизации нормы (12) с показателем $K = 2$. Дискретную модель судна в грузу получим по непрерывной с матрицами (13), приняв шаг дискретности $\text{del} = 0,2$ и выбрав число шагов $N = 80$. Используя оператор преобразования $c2d$, получим:

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.9645 & -0.0506 & 0 \\ -0.7919 & 0.8784 & 0 \\ -0.0817 & 0.1868 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} 0.0267 \\ -0.1539 \\ -0.0154 \end{bmatrix};$$

$$C_d = I, \quad D_d = [0 \ 0 \ 0]^T.$$

Дискретную модель $x(k) = A_d x(k-1) + B_d u(k-1)$, $k = 0, 1, \dots, N$ при малом уровне помех нетрудно преобразовать к виду [1]:

$$x(N) - A_d^N x(0) = Kr \cdot U, \quad (14)$$

где Kr — матрица Крылова, образующая подпространство

$$Kr = [A_d^{N-1} B, A_d^{N-2} B, \dots, A_d B, B].$$

Матрица содержится в галерее специальных функций среды MATLAB и используется в работе для формирования подпространства Крылова в следующей редакции:

$$Kr = \text{gallery}('krylov', A_d, B_d, N).$$

Примечание. В уравнении (14) вектор-столбец U — вектор управления.

Для удобства решения задачи в формате CVX воспользуемся принятыми обозначениями: $A = Kr$, $b = x(N) - A_d^N x(0)$, $x = U$. Тогда наилучшая оценка x при отсутствии ограничений на управление определится по алгоритму:

```

m=3; n=80;
cvx_begin
    variable x(n)
    minimize(norm(A*x - b, 2))
cvx_end

```

Полученный минимум евклидовой нормы обеспечивает управление моделью судна с минимальным расходом энергии. Введение любых ограничений на вектор управления приведет к увеличению критерия качества [14]. Такое управление можно найти путем «наилучшей» подгонки искомого решения к уже найденному $x(n)$. С этой целью используем алгоритм:

```

m1=80; b1=x; v=b;
cvx_begin

```

```
variable u(m1)
minimize(norm(u-b1,2))
subject to
u>=-0.15
v==Kr*u
cvx _end
```

На рис. 2 приведены решения краевой задачи по алгоритму в формате CVX. Рассмотрены режимы оптимизации с введенными ограничениями: на управление $u \geq -0.10$ и перевод процесса в момент N в заданное состояние $x(N)$. Вектор начальных условий определен для трех режимов $x(0) = [0.02 \ -0.09 \ 0.04]^T$. Режим без ограничений на управление получен для краевых условий $x(0) = [0 \ 0 \ 0.03]^T$ и $x(N) = [0 \ 0 \ -0.03]^T$. Критерием качества является минимум нормы: $J = \text{norm}([u-b_1])$.

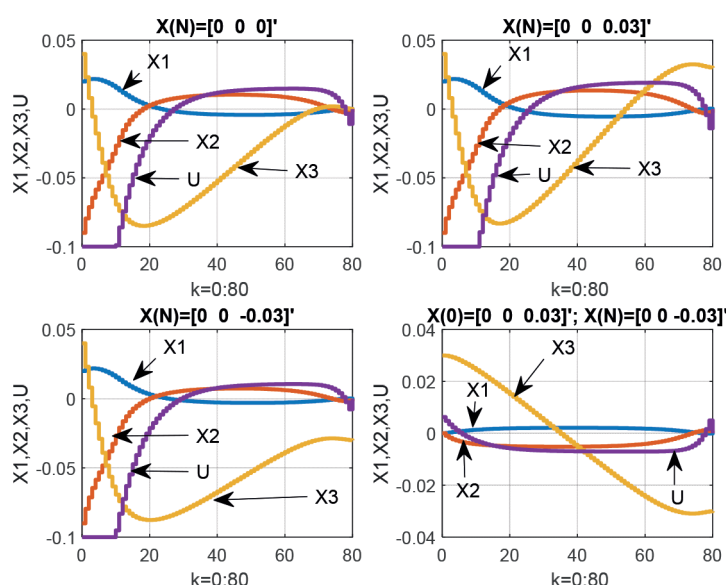


Рис. 2. Траектории судна при минимальном расходе энергии на управление с вектором $x(0) = [0.02 \ -0.09 \ 0.04]^T$ и различными граничными условиями $x(N)$

Для режима с курсовым углом $\varphi(N) = 0$ критерий $J = 0.1711$. Другие оценки:

- угол курса $\varphi(N) = 0.03$ — критерий $J = 0.1816$;
- угол курса $\varphi(N) = -0.03$ — критерий $J = 0.1605$.

При отсутствии ограничений на управление евклидова норма практически равна нулю.

Обсуждение (Discussion)

Современные тенденции поиска новых практических решений в области синтеза оптимальных регуляторов судовых систем управления обращены к мощному математическому аппарату, базирующемуся на теории линейных матричных неравенств, созданной на основе работ А. М. Ляпунова об устойчивости движения [15]. Развитие приложений теории матричных неравенств возможно только с применением вычислительных сред и цифровых систем, в которых требуется выполнение оценок качественных показателей численными методами по различным нормам и многочисленным правилам приведения нелинейных неравенств к линейным формам с достижимыми решениями [16].

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе представлены способ и алгоритм синтеза регуляторов судовых систем на базе теории линейных матричных неравенств.

2. Показано, что на грузовых судах, совершающих обратные балластные или порожние переходы, следует автоматически корректировать параметры регулятора в структуре авторулевого, что позволит повысить управляемость и обеспечить свойства робастности судна на основе LM-технологий.

3. Представлены алгоритмы оптимизации модели судна в конечных разностях по критерию минимума расхода энергии с ограничениями на управление.

4. Приведены примеры синтеза регуляторов, подтверждающие корректность выполненных расчетов в CVX-формате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Модели и алгоритмы управления объектами водного транспорта в условиях цифровой трансформации / С. О. Барышников, Д. В. Дмитриенко, В. В. Сахаров, А. А. Чертков. — СПб.: «Заневская площадь», 2022. — 537 с.

2. Поляк Б. Т. Математическая теория автоматического управления: учеб. пособие / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, Л. Б. Рапопорт. — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 500 с.

3. Grant M. C. The CVX Users' Guide. Release 2.1 / M. C. Grant, S. P. Boyd. — CVX Research, Inc., 2018. — 99 p.

4. Beck A. Introduction to Nonlinear Optimization: Theory, Algorithms and Applications with MATLAB / A. Beck. — The Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Optimization Society, 2014. — 283 p.

5. Каменецкий В. А. Матричные неравенства в теории устойчивости: новые результаты на основе теоремы о свертывании / В. А. Каменецкий // Автоматика и телемеханика. — 2023. — № 2. — С. 103–121. DOI: 10.31857/S000523102302006X.

6. Поляк Б. Т. Линейные матричные неравенства в системах управления с неопределенностью / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков // Автоматика и телемеханика. — 2021. — № 1. — С. 3–54. DOI: 10.31857/S0005231021010013.

7. Глуценко А. И. Адаптивное управление с гарантией экспоненциальной устойчивости. Часть II: Объекты с кусочно-постоянными параметрами / А. И. Глуценко, К. А. Ласточкин // Автоматика и телемеханика. — 2023. — № 3. — С. 65–105. DOI: 10.31857/S0005231023030042.

8. Баландин Д. В. Линейно-квадратичные и γ -оптимальные законы управления по выходу / Д. В. Баландин, М. М. Коган // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 6. — С. 5–14.

9. Баландин Д. В. Оптимальная стабилизация тела в электромагнитном подвесе без изменения его положения / Д. В. Баландин, Р. С. Бирюков, М. М. Коган, А. А. Федюков // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2017. — № 3. — С. 12–24. DOI: 10.7868/S0002338817020044.

10. Хлебников М. В. Оптимизация билинейной системы управления при внешних возмущениях: I. Задача анализа / М. В. Хлебников // Автоматика и телемеханика. — 2019. — № 2. — С. 46–63. DOI: 10.1134/S000523101902003X.

11. Хлебников М. В. Оптимизация билинейной системы управления при внешних возмущениях: II. Задача синтеза / М. В. Хлебников // Там же. — № 8. — С. 29–43. DOI: 10.1134/S000523101908004X.

12. Мухин А. В. Синтез статических регуляторов по выходу на основе решения линейных матричных неравенств / А. В. Мухин // Управление большими системами: сб. тр. — 2021. — № 92. — С. 28–42. DOI: 10.25728/ubs.2021.92.2.

13. Balandin D. V. Multi-Objective Robust Generalised H_2 Control / D. V. Balandin, M. M. Kogan // International Journal of Systems Science. — 2020. — Vol. 51. — Is. 10. — Pp. 1873–1882. DOI: 10.1080/00207721.2020.1780512.

14. Ипполитов С. В. Модель управления динамическими объектами / С. В. Ипполитов, О. Н. Чопоров, Д. В. Лопаткин, А. В. Сизов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2017. — № 2 (17). — С. 13.

15. Хлебников М. В. Оптимизация билинейной системы управления при внешних возмущениях: III. Робастная постановка / М. В. Хлебников // Автоматика и телемеханика. — 2020. — № 6. — С. 47–61. DOI: 10.31857/S0005231020060049.

16. CVX: Matlab software for disciplined convex programming [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://cvxr.com/cvx/> (дата обращения: 15.10.2023).

REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., D. V. Dmitrienko, V. V. Sakharov, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy upravleniya ob"ektami vodnogo transporta v usloviyakh tsifrovoy transformatsii*. SPb.: «Zanevskaya ploshchad'», 2022.
2. Polyak, B.T., M. V. Khlebnikov, and L. B. Rapoport. *Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie*. M.: LENAND, 2019.
3. Grant, Michael C., and Stephen P. Boyd. *The CVX Users' Guide*. Release 2.1. CVX Research, Inc., 2018.
4. Beck, Amir. *Introduction to Nonlinear Optimization: Theory, Algorithms and Applications with MATLAB*. The Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Optimization Society, 2014.
5. Kamenetskii, V. A. "Matrichnye neravenstva v teorii ustoychivosti: novye rezul'taty na osnove teoremy o svertyvaniy." *Automation and Remote Control* 2 (2023): 103–121. DOI: 10.31857/S000523102302006X.
6. Polyak, B. T., M. V. Khlebnikov, and P. S. Shcherbakov. "Linear matrix inequalities in control systems with uncertainty." *Automation and Remote Control* 82.1 (2021): 1–40. DOI: 10.1134/S000511792101001X.
7. Glushchenko, A. I., and K. A. Lastochkin. "Adaptivnoe upravlenie s garantiei eksponentsial'noi ustoychivosti. Chast' II. Ob"ekty s kusочно-postoyannymi parametrami." *Automation and Remote Control* 3 (2023): 65–105. DOI: 10.31857/S0005231023030042.
8. Balandin, D. V., and M. M. Kogan. "Linear-quadratic and γ -optimal output control laws." *Automation and Remote Control* 69.6 (2008): 911–919. DOI: 10.1134/S0005117908060027.
9. Balandin, D. V., R. S. Biryukov, M. M. Kogan, and A. A. Fedyukov. "Optimal stabilization of bodies in electromagnetic suspensions without measurements of their location." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 56.3 (2017): 351–363. DOI: 10.1134/S1064230717020046.
10. Khlebnikov, M. V. "Optimization of bilinear control systems subjected to exogenous disturbances. I. Analysis." *Automation and Remote Control* 80.2 (2019): 234–249. DOI: 10.1134/S0005117919020036.
11. Khlebnikov, M. V. "Optimization of bilinear control systems subjected to exogenous disturbances. II. Design." *Automation and Remote Control* 80.8 (2019): 1390–1402. DOI: 10.1134/S0005117919080022.
12. Mukhin, A. V. "Synthesis of static output controllers based on the solving of linear matrix inequalities." *Large-Scale Systems Control* 92 (2021): 28–42.
13. Balandin, Dmitry V., and Mark M. Kogan. "Multi-objective robust generalised H_2 control." *International Journal of Systems Science* 51.10 (2020): 1873–1882. DOI: 10.1080/00207721.2020.1780512.
14. Ippolitov, S. V., O. N. Choporov, D. V. Lopatkin, and A. V. Sizov. "Model for control dynamic objects." *Modeling, optimization and information technology* 2(17) (2017): 13.
15. Khlebnikov, M. V. "Optimization of bilinear control systems subjected to exogenous disturbances. III. Robust formulations." *Automation and Remote Control* 81.6 (2020): 1003–1016. DOI: 10.1134/S0005117920060053.
16. CVX: Matlab software for disciplined convex programming. Web. 15 Oct. 2023 <<http://cvxr.com/cvx/>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор
ФБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@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
Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: _saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergey O. —
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: rector@gumrf.ru
Vikhrov, Nikolai M. —
CEO
JSC "KSZ"
41, Kanonersky Island, St. Petersburg, 198184,
Russian Federation
e-mail: dock@ksz.spb.ru
Sakharov, Vladimir V. — Dr. of Technical Sciences,
professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: _saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.
Received: November 13, 2023.

ALGORITHM FOR IDENTIFYING PARAMETERS OF PRODUCTION FUNCTION MODELS USING A NEURAL NETWORK

A. A. Chertkov, S. V. Saburov, Ya. N. Kask

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

The purpose of the work is to ensure the monitoring and reliability of statistical data used for the analysis and forecasting of the production development on the basis of generalized indicators that take into account the volume of resources used and the ways of their use. An algorithm for parametric identification of production functions models from time series of statistical data using generalized regression, which provides the best estimation of the parametric optimization error by the method of least squares, is proposed. In contrast to existing assessment methods, neural networks are used to build models, which significantly expand the technical capabilities of modeling and contribute to improving the accuracy of calculations through the use of neural network technologies. It is shown that in order to solve the problems of this class, it is advisable to use generalized regression neural networks with simple training modes and high modeling accuracy. As a result, it is possible to propose an algorithm for quantitative assessment of the production functions parameters, which consists in the construction of a neural model with its subsequent use to fit the trajectory of the production model of a given structure to the obtained data by means of recurrent estimates of the vector of the desired coefficients at a given initial approximation. The proposed algorithm is demonstrated by estimating the parameters of the Cobb-Douglas production function and the discrete-dynamic model of the consumption function according to the corresponding statistical series. The calculations are performed using the functions of the Neural Networks package of the MATLAB software environment. The algorithm is applicable for quantitative estimation of the production models parameters with complex logical-probabilistic relationships, as well as for obtaining numerical values of target indicators and indicators for assessing the inland water transport development by statistical series and monitoring.

Keywords: production model, the consumption function, the Cobb-Douglas model, statistical series, the regression method, estimation of parameters, neural network technology, optimization.

For citation:

Chertkov, Alexandr A., Sergey V. Saburov, and Yaroslav N. Kask. "Algorithm for identifying parameters of production function models using a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1096–1104. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1096-1104.

УДК 621.398.04

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А. А. Чертков, С. В. Сабуров, Я. Н. Каск

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

Целью работы является обеспечение мониторинга и достоверности статистических данных, используемых для анализа и прогнозирования развития производства на основе обобщенных показателей, учитывающих объемы использованных ресурсов и способы их применения. Предлагается алгоритм параметрической идентификации моделей производственных функций по временным рядам статистических данных с использованием обобщенной регрессии, обеспечивающий наилучшую оценку ошибки параметрической оптимизации по методу наименьших квадратов. В отличие от существующих методов оценки для построения моделей используются нейронные сети, значительно увеличивающие технические возможности моделирования и способствующие повышению точности вычислений за счет применения нейросетевых технологий. Показано, что для решения задач рассматриваемого класса целесообразно применять обобщенно-регрессионные нейронные сети, используя простые режимы обучения с высокой точностью

моделирования. В результате рассмотрен алгоритм количественной оценки параметров производственных функций, состоящий в построении нейронной модели с последующим ее использованием для «пригонки» (аппроксимации) к полученным данным траектории производственной модели заданной структуры путем рекуррентных оценок вектора искомых коэффициентов при заданном начальном приближении. Предложенный алгоритм продемонстрирован на примере оценок параметров производственной функции Кобба – Дугласа и дискретно-динамической модели функции потребления по соответствующим статистическим рядам. Вычисления выполнены при помощи функций пакета *Neural Networks* программной среды *MATLAB*. Данный алгоритм предназначен для количественных оценок параметров производственных моделей со сложными логико-вероятностными связями, а также для получения численных значений целевых индикаторов и показателей оценки развития внутреннего водного транспорта по статистическим рядам и мониторингу.

Ключевые слова: производственная модель, функция потребления, модель Кобба – Дугласа, статистический ряд, регрессия, способ, оценка параметров, нейронная сеть, технологии, оптимизация.

Для цитирования:

Чертков А. А. Алгоритм идентификации параметров моделей производственных функций при помощи нейронной сети / А. А. Чертков, С. В. Сабуров, Я. Н. Каск // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1096–1104. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1096-1104.

Введение (Introduction)

Производственные функции используются для численной оценки показателей качества организации и управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий и организаций на основе обобщенных показателей. Для выполнения этих оценок используются статистические методы и алгоритмические инструменты, основанные на долгосрочном опыте работы с моделями, отображающими работу производственных объектов и целых отраслей, показатели эффективности которых оцениваются по параметрам этих моделей. Основным направлением существенного улучшения работы предприятий отрасли водного транспорта является повсеместная автоматизация производственных процессов на основе использования цифровых технологий и интеллектуальных систем, использующих для анализа данных и обработки информации нейронные сети и технологии.

Преимущество производственных функций заключается в возможности их применения в производственных системах любого уровня — от участков (цеха) до предприятия и даже отрасли в целом. При этом каждая производственная система имеет свою собственную производственную функцию, учитывающую специфику использования ресурсов и осуществления технологических процессов. Выбор производственной функции для моделирования и алгоритмизации процессов работы судов требует оценки факторов, которые могут повысить конкурентоспособность в транспортных услугах отрасли. Следует отметить, что существуют различные типы функций для оценки и управления производством. Одной из наиболее известных моделей, предложенных ранее (неоклассической), является *производственная функция Кобба – Дугласа*, которая определяет аналитическую зависимость объема выпуска конечной продукции от затрат труда и финансовых средств.

В отечественной [1]–[5] и иностранной [6] литературе известно множество примеров успешного применения производственной функции Кобба – Дугласа в различных секторах промышленности. Эта функция, широко используемая в экономике переходного периода, государственном управлении, в отраслях промышленности и сельского хозяйства и других отраслях экономики [3], имеет большую практическую значимость как инструмент оценки и прогнозирования развития производства на основе объединенных показателей, учитывающих объемы использованных ресурсов и способы их применения. Кроме функции Кобба – Дугласа, также рекомендуется использовать другие классы производственных моделей, включающих *экзогенные* (внешние) и *эндогенные* (внутренние) переменные (например, модели CES (константной эластичности замещения), модели потребления и связанные модели Клейна). Для анализа таких моделей может быть использован метод анализа временных рядов с применением обобщенных регрессионных нейронных сетей.

При построении моделей производственных функций важной задачей является обеспечение достоверности данных, используемых для анализа. В вопросах эксплуатации водного транспорта и его производственных подразделений специфические технологические процессы требуют создания инструментария анализа статистических рядов в соответствии с положениями классической теории о зависимости объема выпуска продукции от факторов ее производства. Это позволяет обеспечить производство конечной продукции высокого качества, отвечающей актуальным потребностям. Развитие методов организации производственных процессов водного транспорта, управление производственными ресурсами судоходных компаний, портами и другими объектами транспортной инфраструктуры включает использование новых инструментов статистического анализа, основанных на элементах интеллектуальных систем [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка показателей эффективности объектов транспортной инфраструктуры в современных экономических условиях требует постоянной оценки и мониторинга параметров и характеристик. Проведение мониторинга зависит от уровня информационного и технологического обеспечения процессов измерения и обработки информации о состоянии полноты и качества транспортного обслуживания. Применение методов интеллектуального анализа данных в сочетании с моделями производственных функций позволяет расширить применимость классических статистических методов исследования и решать научные задачи, связанные с эксплуатацией водного транспорта. Нейросетевые технологии находят все большее применение на водном транспорте благодаря доступности мощных вычислительных сред и развитию рынка нейропродуктов [7]–[9]. Однако для широкого использования нейронных сетей на водном транспорте необходимы специальные навыки, связанные с особенностями решаемых задач.

При параметрической оценке моделей производственных функций нейронные сети осуществляют отображение множества входных векторов во множество выходных откликов, задаваемое весами нейронной сети с последующей активацией взвешенной суммы этих откликов одной из базисных аппроксимирующих функций локального типа путем поэтапной их адаптации к ожидаемым значениям. Далее происходит настройка параметров модели с заданной структурой, минимизирующая ошибку аппроксимации, оцениваемой по векторной евклидовой норме. Достоинство данного метода оценки по временным рядам по сравнению с известными параметрическими методами заключается в том, что процедура оптимизации не изменяет структуры модели в изначальной полиномиальной форме. Таким образом, решается задача нелинейной идентификации параметров с использованием нейронной сети.

Прежде всего необходимо оценить параметры математических моделей производственных функций на основе статистических данных. Для этой цели была выбрана вероятностная нейронная сеть. Среди различных видов нейронных сетей наиболее подходящей является обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN), которая доступна в инструментарии *Neural Networks Toolbox* в MATLAB. Она обладает быстрым процессом обучения и легко создается с помощью функции *newgrnn* со следующим синтаксисом:

$$Net = newgrnn(P, T, spread),$$

где P — матрица размерности $(m \times n)$ входных векторов;

T — матрица размерности $(k \times n)$ выходных векторов;

spread — заданное отклонение (по умолчанию равно единице).

Для пригонки параметров модели с заданной структурой будем использовать оператор *lsqcurvefit*. Создается файл-функция с определенными границами параметров, где математическая модель производства задается вместе с вектором оптимизации. Для инициализации процесса оптимизации необходим вектор начального приближения. Первоначально оценим параметры производственной функции Кобба – Дугласа с помощью статистических данных. В этой функции учтены факторы производства, такие как затраченный капитал и труд. Влияние изменений внешней среды

на технологию производства будем учитывать введением временного фактора [6], выраженного экспоненциальным множителем с показателем степени b . Это позволит учесть влияние технического прогресса на объем продукции со временем. Математическая модель производственной функции имеет вид

$$Y = Ae^{bt}K_0^\alpha L_0^\beta, \quad (1)$$

где Y — объем продукции;

A , b , α и β — постоянные коэффициенты.

Оценка коэффициентов α и β позволит определить влияние факторов производства и масштаба производства на конечный результат. При соблюдении условия

$$\alpha + \beta = 1 \quad (2)$$

функция (1) однородна, т. е. пропорциональна увеличению затрат ресурсов. Если $\alpha < \beta$, то это означает, что дополнительное привлечение рабочей силы является более предпочтительным, чем увеличение капитальных затрат. Модель (уравнение (1)) включает факторы производства в форме затрат капитала K_0 и трудовых затрат L_0 , а также временной фактор, выраженный экспоненциальным множителем.

Масштабный коэффициент A и постоянные коэффициенты b , α и β будут определены на основе исходных статистических данных. Необходимо составить правильные статистические ряды, учитывая специфику конкретного производства. Оценка затрат капитала и труда является самостоятельной задачей с учетом того, что цены на товары зависят от экономической ситуации, а часть ресурсов может использоваться или сдаваться в аренду другим предприятиям. Воспользуемся исходными данными из [10], представляющими статистический ряд показателей внутренней частной экономики в США для оценки постоянных коэффициентов A , b , α и β модели (1), которые приведены в следующей таблице:.

Статистические ряды показателей экономики США в период 1947–1968 гг.

Год	Конечный продукт Y , млрд долл.	Основной капитал K , млрд долл.	Отработанные человеко-ч L , млрд
1947	280,2	204,2	109,3
1948	293,8	212,9	110,0
1949	292,8	196,2	109,1
1950	322,9	227,4	111,3
1951	343,9	239,4	113,9
1952	352,3	244,3	113,8
1953	369,8	264,9	114,9
1954	364,9	248,1	110,8
1955	395,5	282,2	114,8
1956	402,8	295,2	116,5
1957	408,5	298,2	114,3
1958	403,2	269,5	111,1
1959	431,1	300,4	113,7
1960	441,7	303,9	114,1
1961	449,5	302,7	113,8
1962	479,5	317,0	115,5
1963	499,3	329,6	117,5
1964	522,1	351,7	119,3
1965	569,9	388,2	122,2
1966	599,6	441,2	124,0
1967	612,7	447,4	123,6
1968	643,4	472,9	125,2

Из табличных значений статистических показателей, полученных за 22 года (1947–1968 гг.), сформируем векторы производственной функции Y , а также затрат капитала K и трудовых

ресурсов L , каждый из которых состоит из 22 элементов. Для создания нейронной сети из полученных векторов сформируем вектор выхода T и матрицу входных сигналов P .

Приведем фрагмент программы создания в среде MATLAB нейронной сети net :

```
T=Y';
P=[K L]';
spread=1.0;
net=newgrnn(P, T, spread)
```

Результатом обучения нейросети будут следующие ее основные характеристики:

```
net =
Neural Network (Нейронная сеть)
name: 'Generalized Regression Neural Network'
(наименование: 'Обобщенная регрессионная нейронная сеть').
dimensions (Размерности):
numInputs (Число входов): 1
numLayers (Число слоев): 2
numOutputs (Число выходов): 1
numWeightElements (Число весовых элементов): 88
sampleTime (Интервал дискретности): 1
>>
```

Для оценки качества обучения нейронной сети получим с ее помощью вектор численных значений Y_m , являющихся оценками значений исходной производственной функции Y . С этой целью используем операторную функцию $Y_m = \text{sim}(net, P)$, где P может задаваться пользователем в требуемые моменты времени, не обязательно совпадающие с экспериментом.

Используя численные значения Y_m , вычислим евклидовую норму ошибки моделирования производственной функции, соответствующей разности векторов Y и Y_m . Для получения численного значения эвклидовой нормы в инструментарии MATLAB используем оператор:

```
>> evcm=norm([Y-Ym],2)
evcm =
=3.1192,
```

возвращающий евклидовую норму разности векторов $[Y - Y_m]$, определяемую по формуле

$$\bar{e}_Y = \sqrt{\sum |Y - Y_m|^2}. \quad (3)$$

Полученный результат свидетельствует о высоком качестве обучения сети и возможности ее использования для параметрической идентификации. Графическая интерпретация полученной модели производственной функции представлена на рис. 1.

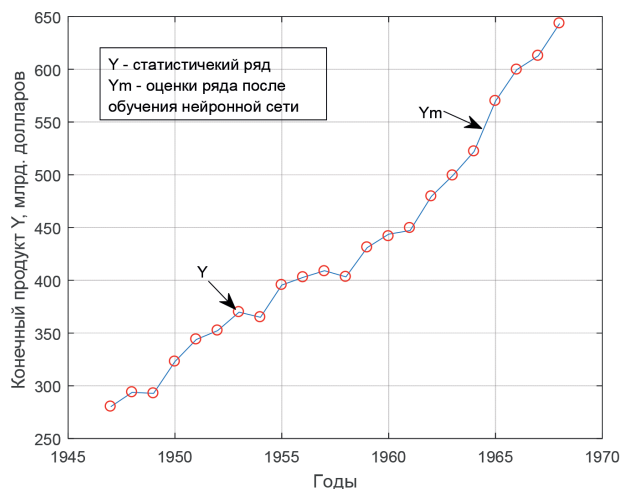


Рис. 1. Графики статистического ряда Y и аппроксимирующей его функции Y_m нейронной модели

Для оценки коэффициентов нелинейной модели (1) будем использовать функцию `lsqcurvefit`, которая позволяет наилучшим образом приблизить выход модели к выходу Y_m , рассчитанному с помощью нейронной сети по формуле (3).

Операция параметрической оптимизации выполняется согласно следующему алгоритму:

1. Создается файл-функция, в которой коэффициенты нелинейной модели (1) представлены в виде вектора переменных состояния без изменения структуры модели.

2. Выполняется оптимизация нелинейной функции (1) по данным вектора Y_m с использованием функции `x = lsqcurvefit(fun, x0, xdata, ydata, lb, ub)`, где аргументы указаны в порядке перечисления: файл-функция, начальное приближение, время, выход нейронной модели, нижняя граница, верхняя граница.

3. Реализуется операция наилучшей оценки вектора x с помощью «пригонки» (аппроксимации) по методу наименьших квадратов:

$$\min_x \|F(x, P) - Y_m\|^2.$$

4. По заданной структуре модели $F(x, P)$ вычисляется оценка ошибки параметрической оптимизации и выполняются графические построения.

Фрагмент файла-сценария, реализующего оценку вектора X согласно пп. 2 алгоритма, включает следующие аргументы функции «пригонки»:

```
t=1:22;
xdata=t';
ydata=Ym';
lb=zeros(3,1); ub=[];
x=lsqcurvefit(@x, xdata)myfun(x, xdata, K, L), ones(3,1)*0.01, xdata, ydata, lb, ub),
где файл-функция «myfun» имеет вид:
function [F]=myfun(x, xdata, K, L);
F=[x(1).*exp(x(2).*xdata).*K.^x(3).*L.^(1-x(3))];
```

Результатами пригонки кривой, описываемой функцией F под значения Y_m , является вектор коэффициентов $x = [x(1); x(2); x(3)]$, наилучшим образом подгоняющих нелинейную функцию F (в файл-функции *function*) к выходным данным Y_m используемой модели нейросети:

```
x =
    2.1845
    0.0236
    0.2545
```

Таким образом, искомые коэффициенты производственной функции (1) равны следующим значениям: $A = x(1) = 2,1845$; $b = x(2) = 0,0236$; $\alpha = x(3) = 0,2545$. Из условия (2) сохранения однородности функции (1) получим $\beta = 1 - \alpha = 1 - 0,2545 = 0,7455$. Таким образом, все коэффициенты производственной функции определены.

Результаты (Results)

В результате параметрической оптимизации путем «пригонки» по методу наименьших квадратов значений статистического ряда показателей Y производственной функции к их оценкам Y_m , сформированным с помощью обобщенно-регрессионной нейронной сети, получим математическую модель производственной функции Кобба – Дугласа вида

$$Y_0 = 0,21845 \cdot \exp(0,0236t) K_0^{0,245} L_0^{0,7455}.$$

Для визуального отображения степени «пригонки» (аппроксимации) идентифицированной нелинейной модели производственной функции Y_0 к ее регрессионной нейросетевой модели Y_m построены графики кривых функций (рис. 2), отображающих эти модели на одном и том же временном интервале.

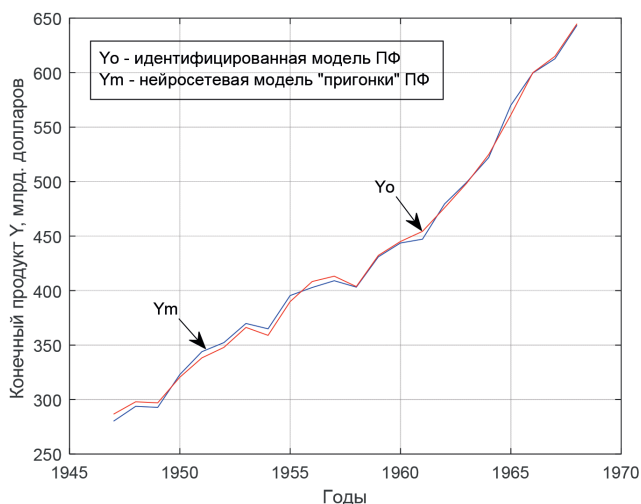


Рис. 2. Идентифицированная модель производственной функцией Y_0 и ее обобщенная регрессионная нейросетевая модель Y_m

Из результатов сравнения обоих графиков следует, что абсолютное расхождение кривых по координате «Конечный продукт Y , млрд. долл.» на интервале 1947–1968 гг. не превосходит численного значения полученной ранее средствами MATLAB евклидовой нормы ошибки регрессионной модели, составляющей 3,1192 млрд долл., т. е. погрешность оценки составляет менее 1 %.

Обсуждение (Discussion)

В работе представлен алгоритмический подход к параметрической идентификации моделей производственной функции на основе статистических данных с использованием обобщенно-регрессионной нейронной сети из пакета STATISTICA Neural Networks в среде MATLAB, адаптированного для использования русскоязычными пользователями. Были описаны методология и технология обучения нейронной сети с оценкой ее качества через евклидову норму ошибки моделирования производственной функции по методу наименьших квадратов (МНК). Для оценки эффективности разработанного алгоритма параметрической идентификации производственной функции было выполнено сравнение с оценками, полученными с помощью МНК. Согласно результатам проведенного сравнительного анализа нейронная сеть и МНК показывают примерно одинаковое качество диагностирования состояния транспортной инфраструктуры, однако в условиях наличия шумов нейронная сеть демонстрирует более низкую ошибку распознавания.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Преимуществом использования обобщенно-регрессионной нейронной сети для диагностирования состояния транспортной инфраструктуры является возможность автоматической классификации и кластеризации состояний на основе обучающей выборки без участия эксперта.
2. Нейронные сети могут успешно применяться для диагностирования состояния транспортной инфраструктуры, обеспечивая работу с реальными данными и данными, вычисленными на основе математических моделей. Это позволяет принимать обоснованные решения на основе сравнения таких данных.
3. Рассмотренный метод применим для оценки коэффициентов моделей производственных функций по статистическим рядам различных классов с нелинейными зависимостями и сходимостью решений в соответствии с технологическими ограничениями. К таким функциям относятся линейные, мультипликативные, с постоянной эластичностью замещения (CES-функции), Леонтьева, Кобба – Дугласа, линейно-однородные, транслогарифмические, с взаимно-дополняющими ресурсами и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчинская Е. Э. Исследование факторов роста промышленности России с использованием производственной функции / Е. Э. Колчинская, С. Н. Растворцева // Актуальные проблемы экономики и права. — 2013. — № 4. — С. 152–158.
2. Рузанов А. И. Производственные функции и их использование для описания закономерностей производства / А. И. Рузанов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 5–1. — С. 212–217.
3. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
4. Суворов Н. В. Применение производственной функции Кобба-Дугласа для анализа промышленного комплекса региона / Н. В. Суворов, Р. Р. Ахунов, Р. В. Губарев, Е. И. Дзюба, Ф. С. Файзуллин // Экономика региона. — 2020. — Т. 16. — № 1. — С. 187–200. DOI: 10.17059/2020-1-14.
5. Дмитриенко Д. В. Модели и алгоритмы эффективной эксплуатации объектов водного транспорта / Д. В. Дмитриенко. — СПб.: Судостроение, 2010. — 203 с.
6. Кубонива М. Математическая экономика на персональном компьютере: пер. с яп. / М. Кубонива, М. Табата, С. Табата, Ю. Хасэбэ; под ред. М. Кубонива; под ред. и с предисл. Е. З. Демиденко. — М.: Финансы и статистика, 1991. — 304 с.
7. Сидоров А. В. Диагностика состояния транспортной инфраструктуры с использованием нейронных сетей / А. В. Сидоров, С. В. Михеев, А. А. Осьмушин // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 215.
8. Сазонов А. Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
9. Дерябин В. В. Применение нейронной сети в модели счисления пути судна / В. В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 3 (65). — С. 20–27.
10. Кротов В. Ф. Основы теории оптимального управления / В. Ф. Кротов, Б. А. Лагоша, С. М. Лобанов, Н. И. Данилина, С. И. Сергеев. — М.: Высшая школа, 1990. — 432 с.

REFERENCES

1. Kolchinskaya, E. E., and S. N. Rastvortseva. "Research of the factors of industrial growth in Russia using the production function." *Russian Journal of Economics and Law* 4 (2013): 152–158.
2. Ruzanov, A.I. "Production functions and their use to describe the patterns of production." *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod* 5–1 (2011): 212–217.
3. Sakharov, V. V., A. A. Kuz'min, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov na ob'ekтах водного транспорта v srede MATLAB: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015.
4. Suvorov, N. V., R. R. Akhunov, R. V. Gubarev, E. I. Dzyuba, and F. S. Fayzullin. "Applying the Cobb-Douglas Production Function for Analysing the Region's Industry." *Economy of Regions* 16.1 (2020): 187–200. DOI: 10.17059/2020-1-14
5. Dmitrienko, D. V. *Modeli i algoritmy effektivnoi ekspluatatsii ob'ektov vodnogo transporta*. SPb.: Sudostroenie, 2010.
6. Kuboniva, M., M. Tabata, S. Tabata, and Yu. Khasebe. *Matematicheskaya ekonomika na personal'nom komp'yutere*. Edited by M. Kuboniva and E. Z. Demidenko. M.: Finansy i statistika, 1991.
7. Sidorov, A. V., S. V. Mikheev, and A. A. Osmushin. "Diagnosis of the transport infrastructure using neural networks." *Modern problems of science and education* 6 (2013): 215.
8. Sazonov, A.E., and V. V. Deryabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 7–13.
9. Deryabin, V. V. "Neural network implementation in vessel's dead reckoning model." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(65) (2011): 20–27.
10. Krotov, V. F., B. A. Lagosha, S. M. Lobanov, N. I. Danilina, and S. I. Sergeev. *Osnovy teorii optimal'nogo upravleniya*. M.: Vysshaya shkola, 1990.

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

Сабуров Сергей Валерьевич —

кандидат технических наук

Котласский филиал ФГБОУ ВО

«ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: _saharov_@rambler.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

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

Saburov, Sergey V. —

PhD

Kotlas branch of Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: _saharov_@rambler.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

Статья поступила в редакцию 4 ноября 2023 г.

Received: November 4, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114

RISK MANAGEMENT IN SOFTWARE DEVELOPMENT IN THE FIELD OF INFORMATION PROTECTION

I. M. Yastrebov

YADRO SOFTWARE DEVELOPMENT CENTER, LLC., Moscow, Russian Federation

In the context of increasing digitalization of sea and river transport, the immersion of the entire transport infrastructure in the digital environment, the volume of information flows serving the transport process is increasing, and the requirements for information protection are increasing in conditions of an aggressive external information environment. In the digital environment, a software product must not only serve the document flow of transport chains, but also ensure its confidentiality. Automation of transport facilities (ships, platforms, berths, warehouses) management increases their potential vulnerability from unauthorized access to control systems; the latter must be taken into account in servicing programs, increasing their size (for example, there is a need to fragment coherent information blocks and their alternative routing). This, in turn, increases the risk of errors in the software products themselves and significantly complicates their structure. Risks of failures (including confidentiality violations) during the software operation that implements information exchange can entail significant material and reputational losses for the developer. If the developer is legally and functionally involved in the industry, such losses can and should be considered among the general range of risks in water transport. An important aspect of risk management, which until recently was practically not considered in a quantitative aspect within the framework of mathematical models, is the joint consideration of losses when a risk situation occurs and the developer's costs associated with reducing the likelihood of such occurrences; the latter may entail a reduction in the total expected losses, formalized as the corresponding mathematical expectation. As a result, risk management can be formulated in terms of mathematical programming problems with different (discrete or continuous) sets of constraints and with different properties of objective functions.

Keywords: risk management, optimizing, math modeling, information flows, software development, program complexity.

For citation:

Yastrebov, Ivan M. "Risk management in software development in the field of information protection." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114.

УДК 004.6:656.6

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

И. М. Ястребов

ООО «ЯДРО ЦЕНТР ПРОГРАММНЫХ РАЗРАБОТОК», Москва, Российская Федерация

Темой работы является исследование проблем, связанных с возрастающим объемом обслуживающих транспортный процесс информационных потоков и повышением требований к защите информации в условиях агрессивной внешней информационной среды в условиях нарастания цифровизации морского и речного транспорта, а также трансформации в ней всей транспортной инфраструктуры. В цифровой среде программный продукт должен не только обслуживать документооборот транспортных цепочек, но и обеспечивать его конфиденциальность. Автоматизация управления транспортными объектами (суда, платформы, причалы, склады) увеличивает их потенциальную уязвимость от несанкционированного доступа к системам управления; последнее должно учитываться в обслуживающих программах, увеличивая их размер (например, возникает необходимость дробления связанных информационных блоков и их альтернативной маршрутизации). Это в свою очередь повышает риски появления ошибок в самих программных продуктах, и значительно усложняет их структуру. Риски сбоев (в том числе нарушения конфиденциальности) при работе программного обеспечения, реализующего информационный обмен, могут повлечь за собой для разработчика существенные материальные и репутационные потери. В случае юридической и функциональной включенности разработчика в отрасль такие потери могут и должны рассматриваться в общем ряду

рисков на водном транспорте. Важным аспектом управления рисками, который до последнего времени практически не рассматривался в количественном аспекте в рамках математических моделей, является совместное рассмотрение потерь при наступлении ситуации риска и затрат разработчика, связанных с уменьшением вероятностей таких наступлений; последнее может повлечь уменьшение общих ожидаемых потерь, формализованных как соответствующие математические ожидания. В результате управление рисками может быть сформулировано в терминах задач математического программирования с различными (дискретными либо непрерывными) множествами ограничений и различными свойствами целевых функций.

Ключевые слова: управление рисками, оптимизация, математическое моделирование, информационные потоки, программирование, сложность программ.

Для цитирования:

Ястребов И. М. Управление рисками при разработке программного обеспечения в области защиты информации / И. М. Ястребов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114.

Введение (Introduction)

Общие положения национального стандарта по управлению рисками¹ требуют в случае проектов по созданию программного обеспечения (ПО) дальнейшей конкретизации. В источнике [1, с. 28] отмечается следующее: «Руководители проектов часто уверяют, что клиенты никогда не пойдут ни на один проект, если будут понимать риски». Тем не менее, по мнению самих руководителей, такое понимание, безусловно, необходимо при календарном планировании проекта и распределении человеческих (прежде всего) ресурсов. В [2, с. 24] количественное (в отличие от многих качественных, описательных) определение риска как математическое ожидание случайной величины ущерба служит отправной точкой для дальнейшей детализации и перехода от оценки вероятностей наступления рисков к минимизации связанных с этим вероятных потерь.

Риск-факторы по своей природе являются случайными, поэтому управление рисками в количественных аспектах должно основываться на теоретико-вероятностной методологии [3]. Важной и неизбежной отправной точкой является определение исходных вероятностей и распределений для параметров, включаемых в математическую модель. Здесь наряду с экспертными априорными оценками (в том числе байесовский подход, когда определение вероятности как относительной частоты дополняется ее субъективной оценкой) может привлекаться аппарат регрессионного анализа.

Анализ публикаций в периодических изданиях и электронных публикаций по проблеме управления рисками при разработке ПО (например, [4]–[6] и др.) показывает, что практически во всех случаях речь идет лишь о содержательном перечислении некоторых неблагоприятных ситуаций, без построения каких-либо математических моделей, выводющих риск-менеджмент при разработке ПО на количественные критерии. Отчасти такое положение дел связано с тем, что некоторые и, возможно, важные факторы риска трудно поддаются количественной оценке и упреждению. В этой связи необходимо отметить наиболее важные из них [7]:

- изменение состава команды разработчиков в ходе исполнения проекта;
- неправильная оценка компетенций членов команды разработчиков;
- изменения требований заказчика к функционалу программного продукта;
- излишний оптимизм при назначении сроков;
- отсутствие навыков проектного менеджмента, хищение исходного кода, нарушение закона об авторском праве [8] и т. п.

Предлагаемые в этих публикациях упреждающие мероприятия, такие, например, как «правильная организация процесса», «процесс разработки должен быть гибким», правильные по своей сути, вряд ли можно безоговорочно включить в какую-либо математическую модель риск-менеджмента. В то же время некоторые IT-разработки на водном транспорте (возможно, впервые для решения данной проблемы) были ориентированы на создание теоретико-вероятностных математических моделей (в том числе оптимизационных [9]–[11]), объединяющих вероятности одновременных

¹ ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.

и разновременных, единичных и каскадных рисков с потерями при их наступлении и затратами на снижение указанных вероятностей [9]–[15].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В соответствии с исследуемой концепцией исходной предпосылкой для математического моделирования риск-менеджмента при разработке защитного ПО будем считать следующее предположение: за счет увеличения материальных затрат и рабочего времени можно снизить до некоторого уровня вероятность p наступления любого риск-фактора, а значит, и математическое ожидание сопутствующих потерь, но при этом существует вероятность того, что дополнительные расходы могут превысить ожидаемые потери при больших значениях p . Это предопределяет многовариантность задачи и необходимость привлечения методов математического программирования

Разработка программного обеспечения в области защиты информации, как правило, реализуется в рамках больших проектов, в которых участвуют несколько подразделений компании-разработчика. Риски ошибок возникают при этом как внутри отдельного подразделения (группы разработчиков отдельного программного модуля), так и на стадии их сопряжения в более крупные блоки.

Процесс разработки большого ПО является стадийным. Представляется, что количественные методы риск-менеджмента по своей природе применимы прежде всего к следующим стадиям:

- создание исходного кода;
- внутреннее тестирование;
- мониторинг базового периода эксплуатации.

К риск-факторам, учитываемым в рамках предлагаемой модели, относятся:

- превышение сроков разработки программного продукта в целом либо его отдельных модулей;
- ошибки программирования.

За рамками модели, таким образом, остаются внешние риск-факторы — такие, как, например, изменение требований заказчика, изменение законодательства, внеэкономическое изменение структуры рынка и его условий (санкции), волатильность валютного рынка и др.

В процессе исследования были использованы следующие инструменты снижения рисков.

1. *Оценка влияния сложности программ на затратную оценку риска.* Известен неформальный подход к определению сложности программного продукта (обозначим этот параметр через s), действующий, разумеется, «в среднем», когда уровень сложности программного продукта (ПП) напрямую связан с его длиной l . Априори здесь естественно предполагать прежде всего линейную либо квадратичную зависимость. Будем считать программный модуль сложным (и, значит, подверженным специфическим рискам, связанным с программированием) в следующих случаях:

1. Если число M функционально-тематически ориентированных групп разработчиков подмодулей не менее порогового значения M_0 (в частности, в предельном случае отдельная группа может состоять из одного разработчика); разумеется, неравенство для M_0 может назначаться в каждом случае исходя из индивидуальных особенностей проекта.

2. Если код имеет большой прогнозный размер l (без учета возможности реализации риск-факторов). Следует отметить, что l — труднопрогнозируемый параметр. Возможна его экспертная оценка с привлечением моделей нечеткой логики и нечетких множеств [16]. Другой широко используемой является оценка по количеству функциональных точек (FPA), регламентированная в ISO 20296:2009. Данная методика измерения программного продукта базируется на фиксации и подсчете единиц пользовательского функционала. Указанным стандартом задаются исходные дефиниции и описывается алгоритм метода измерения функциональных размеров (FSM) [17];

В качестве апостериорной альтернативы, в отличие от априорной (экспертной), укажем на оценку в тысячах строк ([klc] — kilo lines of code). Анализ литературы показывает, что в последнем случае в примерах для сложных программ нижняя граница для l составляет 20 klc. Представляется важным следующее методологическое замечание: *если каким-либо путем может быть получена интегральная количественная оценка R риска проекта (либо его отдельного этапа) как безразмерная*

вероятность или размерная (затратная), то интерес представляет прежде всего не абсолютное значение R , которое само по себе малоинформативно, а сравнение значений R , рассчитанных по единой методике для альтернативных способов построения логической, кадровой и календарной структуры всего проекта.

3. Современные технологии программирования предусматривают поступление набора разработанных подмодулей для сопряжения (сборки, настройки и тестирования — development & operations) отдельному исполнителю (dev-ops-инженеру). При этом одной из его функций является security-engineering, включающая разработку и запуск тестов, анализирующих возможные уязвимости. Вероятность их появления повышается именно при сопряжении частей кода, выполненных разными разработчиками. Последнее означает, что логическая структура исполнения ПП может быть представлена ориентированным графом.

4. Для каждого исполнителя исходным календарным планом — сетевым графиком при его графическом представлении — задано время исполнения t . С учетом современных технологий разработки программного продукта рассмотрим ситуацию с N разработчиками отдельных программных модулей ($PK_1, PK_2, \dots, PK_N$) и dev-ops-инженером (PK_0).

II. Математическая модель минимизации рисковых потерь. С каждым разработчиком $j = 0, 1, \dots, N$ свяжем набор параметров, задающих сигнатуру модуля, т. е. количественные плановые значения (l_j, t_j) . Далее для каждого j введем следующие параметры:

— зависимость вероятности p_j наступления превышения Δt плановой длительности от этого превышения:

$$p_j = p_j(\Delta t);$$

— зависимость вероятных потерь $\Delta^t z_j$ от превышения Δt :

$$\Delta^t z_j = \Delta^t z_j(\Delta t);$$

— зависимость вероятности π_j наступления превышения Δl планового размера ПП от этого превышения:

$$\pi_j = \pi_j(\Delta l);$$

— зависимость вероятных потерь $\Delta^l z_j$ от превышения Δl :

$$\Delta^l z_j = \Delta^l z_j(\Delta l)$$

(заметим, что если размер ПП измеряется количеством функциональных точек, то через параметр Δl находит свое выражение риск изменения требований заказчика уже в ходе создания ПП).

Естественно предполагать, что функции p_j и π_j должны иметь убывающий характер, а функции $\Delta^t z_j, \Delta^l z_j$ — возрастающий.

Рассмотрим сначала дискретную постановку. Будем в этом случае исходить для j -го исполнителя из набора реперных точек превышения по времени:

$$\Delta t_1 < \Delta t_2 < \dots < \Delta t_n$$

и аналогичного набора превышений изначально предполагаемого размера ПП:

$$\Delta l_1 < \Delta l_2 < \dots < \Delta l_m.$$

На основе ранее использованных обозначений введем:

$\Delta^t z_{ji}$ — рисковые потери при реализации рискового фактора Δt_i для j -го исполнителя;

$\Delta^l z_{ji}$ — рисковые потери при реализации рискового фактора Δl_i для j -го исполнителя.

В этом случае функции p_j и π_j реализуются наборами констант — соответственно $p_{ji} = p_j(\Delta t_i)$, $\pi_{ji} = \pi_j(\Delta l_i)$. Назначение (экспертное) вероятностей должно обеспечивать свойство законов распределения:

$$\sum_{i=1}^n p_{ji} = 1; \quad \sum_{i=1}^m \pi_{ji} = 1; \quad j = 1, \dots, N.$$

Если изначально в усредненных экспертных оценках это равенство не выполняется (что естественно, поскольку оценки разных экспертов независимы), следует перейти от них к средневзвешенным величинам:

$$p_{jk} := p_{jk} / \sum_{i=1}^n p_{ji}; \quad \pi_{jk} := \pi_{jk} / \sum_{i=1}^m \pi_{ji}; \quad j = 0, 1, \dots, N. \quad (1)$$

Реализация рисков Δt_{ji} , Δl_{ji} предполагает, что «по пути» были реализованы риски с меньшими значениями $\Delta t_{j1}, \dots, \Delta t_{j,i-1}$ и $\Delta l_{j1}, \dots, \Delta l_{j,i-1}$; это должно находить отражение в задании затратных функций что, однако, не означает обязательный равномерный рост (линейность). Тогда вероятные дополнительные рисковые затраты $\Delta z_{\text{риск}}^{\text{пасс}}$ для отдельного j -го исполнителя группы разработчиков задаются выражениями (математическими ожиданиями) случайной величины $\Delta Z_j^{(t)}$, имеющей закон распределения $(\Delta^t z_{j1}, \dots, \Delta^t z_{jn}; p_{j1}, \dots, p_{jn})$, и случайной величины $\Delta Z_j^{(l)}$, имеющей закон распределения $(\Delta^l z_{j1}, \dots, \Delta^l z_{jm}; \pi_{j1}, \dots, \pi_{jm})$. Суммирование этих затрат по всем исполнителям дает формулу

$$\Delta z_{\text{риск}}^{\text{пассив}} = \sum_{j=0}^N \left(\sum_{i=1}^n p_{ji} \Delta^t z_{ji} + \sum_{i=1}^m \pi_{ji} \Delta^l z_{ji} \right). \quad (2)$$

Если на стадии планирования разработки программного продукта сразу добавить $\Delta z_{\text{риск}}^{\text{пасс}}$ к базовой стоимости разработки, то такой — *пассивный* — риск-менеджмент означает фактический отказ от управления рисками (хотя остается актуальной задача адекватного назначения функций p_j и π_j , а также функций затрат $\Delta^t z_j$, $\Delta^l z_j$). В противоположность этому управление рисками с помощью математического моделирования в описываемой далее постановке исходит из предполагаемой возможности уменьшения риск-факторов Δt и Δl за счет дополнительных *упреждающих*, (*профилактических*) затрат, что может оказаться выгодным, если итоговые вероятные затраты на выполнение проекта уменьшатся.

Итак, математическая модель управления рисками при создании ПП может быть формализована путем совместного рассмотрения двух разнонаправленных тенденций: уменьшение математического ожидания дополнительных потерь при уменьшении вероятностей p_j , π_j , но при этом одновременное возникновение дополнительных затрат для обеспечения этих новых значений вероятностей (например, при увеличении числа разработчиков, либо за счет сверхурочной работы коллектива и т. д.).

Введем (для простоты одинаковые для каждого j -го исполнителя) функции Δp_i , $\Delta \pi_i$, $0 \leq \Delta p_i \leq 1$, $i = 1, \dots, n$, $0 \leq \Delta \pi_i \leq 1$, $i = 1, \dots, m$, связанные с целенаправленным уменьшением вероятностей p_{ji} , π_{ji} до значений $\tilde{p}_{ji}$, $\tilde{\pi}_{ji}$ следующим образом:

$$\tilde{p}_{ji} = p_{ji}(1 - \Delta p_i), \quad \tilde{\pi}_{ji} = \pi_{ji}(1 - \Delta \pi_i).$$

Предположим, что эти новые вероятности сохраняют свойство монотонного убывания по i . При этом, однако, $\sum_{i=1}^n \tilde{p}_{ji} < 1$, $\sum_{i=1}^m \tilde{\pi}_{ji} < 1$. Возникающие невязки устраняются при расширенном истолковании распределений случайных величин $\Delta Z_j^{(t)}$ и $\Delta Z_j^{(l)}$. Именно отсутствующие при пассивном управлении затраты $\Delta u_{j1}, \dots, \Delta u_{jn}$ и $\Delta v_{j1}, \dots, \Delta v_{jm}$ на уменьшение значений p_{ji} , π_{ji} понимаются как имеющие нулевые вероятности, т. е. законы распределения записываются в виде:

$$(\Delta^t z_{j1}, \dots, \Delta^t z_{jn}, \Delta u_{j1}, \dots, \Delta u_{jn}; p_{j1}, \dots, p_{jn}, 0, \dots, 0); (\Delta^l z_{j1}, \dots, \Delta^l z_{jm}, \Delta v_{j1}, \dots, \Delta v_{jm}; \pi_{j1}, \dots, \pi_{jm}, 0, \dots, 0),$$

а при активном управлении эти законы приобретают для уже ненулевых дополнительных затрат ненулевые вероятности:

$$(\Delta^t z_{j1}, \dots, \Delta^t z_{jn}, \Delta u_{j1}, \dots, \Delta u_{jn}; p_{j1}(1 - \Delta p_1), \dots, p_{jn}(1 - \Delta p_n), p_{j1}\Delta p_1, \dots, p_{jn}\Delta p_n)$$

и, соответственно,

$$(\Delta^l z_{j1}, \dots, \Delta^l z_{jm}, \Delta v_{j1}, \dots, \Delta v_{jm}; \pi_{j1}(1 - \Delta \pi_1), \dots, \pi_{jm}(1 - \Delta \pi_m), \pi_{j1}\Delta \pi_1, \dots, \pi_{jm}\Delta \pi_m).$$

В этом случае выполняется необходимое равенство для сумм вероятностей.

В результате ожидаемые потери при активном управлении рисками задаются меньшим значением

$$\Delta z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^n p_{ji} (1 - \Delta p_i) \Delta^t z_{ji} + \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^m \pi_{ji} (1 - \Delta \pi_i) \Delta^l z_{ji}, \quad (3)$$

а дополнительные затраты $Z_{\text{риск}}^{\text{актив}}$ имеют вид

$$Z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^n p_{ji} \Delta p_i \Delta u_{ji} + \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^m \pi_{ji} \Delta \pi_i \Delta v_{ji} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \sum_{j=0}^N p_{ji} \Delta u_{ji} + \sum_{i=1}^m \Delta \pi_i \sum_{j=0}^N \pi_{ji} \Delta v_{ji}. \quad (4)$$

$$\text{Обозначим } \Delta \tilde{u}_i = \sum_{j=0}^N p_{ji} \Delta u_{ji}, \quad \Delta \tilde{v}_i = \sum_{j=0}^N \pi_{ji} \Delta v_{ji}.$$

Тогда $Z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \Delta \tilde{u}_i + \sum_{i=1}^m \Delta \pi_i \Delta \tilde{v}_i$ линейно зависит от Δp_i и $\Delta \pi_i$. Тем не менее результирующий эффект активного управления:

$$\Theta_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \Delta z_{\text{риск}}^{\text{пасс}} - \Delta z_{\text{риск}}^{\text{актив}} - Z_{\text{риск}}^{\text{актив}}, \quad (5)$$

нельзя включить в задачу линейного программирования в качестве максимизируемой целевой функции ввиду того, что условия на допустимые значения управляемых переменных Δp_i и $\Delta \pi_i$, связанные с обеспечением монотонности вероятностей, не гарантируют невыпуклость множества ограничений на управляемые переменные.

Перебор различных стратегий управления, связанных с изменениями настраиваемых параметров модели (2)–(4) позволяет риск-менеджменту выбрать вариант, соответствующий максимальному положительному эффекту. Формулы (2) существенно упрощаются, если риск-менеджмент ограничится для каждого j единственным возможным значением для превышения времени исполнения и превышения размера кода: Δt , Δl и, соответственно, параметрами Δp , $\Delta \pi$. Для этого случая запишем:

$$\Delta z_{\text{риск}}^{\text{актив}} + Z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N p_j (1 - \Delta p) \Delta^t z_j + \pi_j (1 - \Delta \pi) \Delta^l z_j + \Delta p \cdot p_j \Delta u_j + \Delta \pi \cdot \pi_j \Delta v_j.$$

В данном случае (в соответствии с известным в математической статистике компромиссом «точность vs надежность») уменьшение количества необходимых экспертных оценок повышает надежность модели. Возможно, на практике управление рисками будет исходить (в том числе из-за взаимозависимости параметров) из априорно заданного приемлемого значения $Z_{\text{риск}}^{\text{актив}}$, которое управление проектом готово принять. Тогда должно быть рассчитано новое значение рискованных потерь, для чего нужно пересчитать вероятности превышений. Для этого находятся значения $i = i_t$, $i = i_l$, для которых нарастающие суммы рискованных потерь:

$$\Delta_{i_t} z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^{i_t} p_{ji} (1 - \Delta p_i) \Delta^t z_{ji} + \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^{i_l} \pi_{ji} (1 - \Delta \pi_i) \Delta^l z_{ji}, \quad (6)$$

оказываются наиболее близкими снизу к упреждающим затратам $Z_{\text{риск}}^{\text{актив}}$. Тогда полный результат активного управления с учетом потерь и затрат

$$P_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N \sum_{i=i_t+1}^n \Delta p_i p_{ji} \Delta u_{ji} + \sum_{j=0}^N \sum_{i=i_l+1}^m \Delta \pi_i \pi_{ji} \Delta v_{ji} + Z_{\text{риск}}^{\text{актив}}, \quad (7)$$

а эффект

$$\Theta_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \Delta z_{\text{риск}}^{\text{пассив}} - P_{\text{риск}}^{\text{актив}}. \quad (8)$$

В *континуальной постановке* вероятность $p_j(\Delta t)$ превышения планового срока на Δt для j -го исполнителя рассматривается как непрерывная функция от Δt и служит плотностью распределения случайной величины — функции вероятных рискованных потерь $\Delta^t z_j(\Delta t)$; аналогичный смысл имеют, соответственно, функции $\pi_j(\Delta l)$ и $\Delta^l z_j(\Delta l)$. Пусть ΔT , ΔL — реальные границы

возможного изменения параметров Δt , Δl (аналоги Δt_n , Δl_m дискретного случая). Среднее значение пассивных (в прежнем смысле) рискованных потерь представляется интегральным выражением

$$\Delta_j z = \int_0^{\Delta T} p_j(\Delta t) \Delta' z_j(\Delta t) d(\Delta t) + \int_0^{\Delta L} \pi_j(\Delta l) \Delta' z_j(\Delta l) d(\Delta l),$$

а полные рискованные потери

$$\Delta z_{\text{риск}}^{\text{пассив}} = \sum_{j=0}^N \Delta_j z.$$

С целью математического моделирования активного риск-менеджмента введем по аналогии с дискретным случаем экспертным путем для каждого j функцию $\Delta p(\Delta t)$, отвечающую следующим ограничениям:

- $p_j(\Delta t)$ не возрастает;
- $p_j(\Delta t)(1 - \Delta p(\Delta t))$ не возрастает;
- $0 \leq \Delta p(\Delta t) \leq 1$.

Далее вновь следует рассмотреть следующие затраты:

- $\Delta u(\Delta t)$ на снижение пассивно ожидаемой вероятности $p_j(\Delta t)(1 - \Delta p(\Delta t))$ до величины $p_j(1 - \Delta p_j)$
- $\Delta v(\Delta l)$ на мероприятия по снижению пассивно ожидаемой вероятности $\pi_j(\Delta l)$ на величину $\pi_j(\Delta l)(1 - \Delta \pi(\Delta l))$.

Обозначим $\tilde{p}_j(\Delta t) = p_j(\Delta t)(1 - \Delta p(\Delta t))$, $\tilde{\pi}_j(\Delta l) = \pi_j(\Delta l)(1 - \Delta \pi(\Delta l))$. Тогда ожидаемые рискованные затраты при активном менеджменте с использованием этих функций получают следующее выражение:

$$\Delta z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N \int_0^{\Delta T} p_j(\Delta t) \Delta p(\Delta t) \Delta u(\Delta t) d(\Delta t) + \int_0^{\Delta L} \pi_j(\Delta l) \Delta \pi(\Delta l) \Delta v(\Delta l) d(\Delta l),$$

а ожидаемые рискованные потери —

$$\Delta z_{\text{риск}}^{\text{актив}} = \sum_{j=0}^N \int_0^{\Delta T} \tilde{p}_j(\Delta t) \Delta' z_j(\Delta t) d(\Delta t) + \sum_{j=0}^N \int_0^{\Delta L} \tilde{\pi}_j(\Delta l) \Delta' z_j(\Delta l) d(\Delta l).$$

В заключение следует отметить, что естественной областью приложения континуальной модели являются объекты (например, судовые двигатели), рискованные параметры которых по своей физической природе допускают непрерывное изменение (температура, напряжение и т. п.).

Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussion)

В результате исследования задачи управления рисками при разработке программных продуктов обслуживания информационных потоков на водном транспорте разработаны два подхода. В модели пассивного управления построена методика определения возможных рискованных потерь на основе как дискретного, так и континуального представления риск-факторов и соответствующих им вероятностей. В основе модели активного управления находится идея о возможном снижении суммарных рискованных потерь за счет целенаправленного изменения исходных вероятностей рисков, при условии, что снижение пассивной составляющей общих затрат / потерь превысит дополнительные затраты на указанное снижение.

В рамках исследования выполнено следующее:

- введены понятия пассивного и активного управления рисками;
- выделены два фактора риска, подверженные управлению в проектах разработки программного продукта: превышение планового размера кода и превышение планового срока исполнения;
- предложено количественное выражение для этих факторов в виде реперных точек в дискретной модели и в виде непрерывных функций в континуальной модели;
- предложены способы экспертного задания вероятностей факторов риска в виде дискретных либо, соответственно, непрерывных распределений;
- получены формулы для определения рискованных потерь при пассивном управлении и потерь / затрат при активном управлении.

В рамках изложенного подхода появляется возможность сравнения риск-менеджмента проекта с альтернативными вариантами снижения вероятности рисков по итоговому соотношению значений затрат на снижение вероятностей и меньших ожидаемых потерь при реализации рисков с полученными новыми вероятностями.

Заключение (Conclusion)

Управление рисками при разработке программных продуктов обслуживания информационных потоков на водном транспорте (в том числе связанных с информационной защитой) позволяет помимо традиционного оценивания потерь при реализации рисков превышения размеров кода и длительности исполнения использовать *активный подход*. Его базовой предпосылкой является представление о возможном снижении общих затрат на проект в случае, когда затраты на организационные мероприятия разработчика по снижению вероятностей риска окажутся меньше ожидаемого при этом снижения рискованных потерь.

Предложенная в статье методика, основанная на математическом моделировании процесса взаимодействия рискованных потерь, управленческих затрат и их итогового результата, позволяет использовать, как правило, несовпадающие экспертные оценки, выполненные средствами теоретико-вероятностного аппарата. При этом критериальные показатели качества риск-менеджмента выступают как математические ожидания вводимых в рассмотрение случайных величин — как дискретных, так и (при альтернативном подходе) непрерывных. Предложены способы расчета соответствующих затратных функций и сформулированы ограничения на них, вытекающие из вероятностной природы параметров модели. Указаны возможные области применения континуальных моделей в технических системах водного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демарко Т. Вальсируя с медведями: управление рисками в проекте при разработке программного обеспечения / Т. Демарко, Т. Листер. — М.: Компания р. m. Office, 2005. — 190 с.
2. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков на внутреннем водном транспорте Российской Федерации / В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Сикарев // Вестник Астраханского Государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27.
3. Anatoliy P. N. Aggregation process for implementation of application security management based on risk assessment / A. P. Nyrkov, Yu. F. Katorin, V. D. Gaskarov, Ya. V. Kosyak, A. V. Sauchev // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2018. — Pp. 98–101. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317039.
4. Холин А. И. Основные риски, связанные с разработкой программного обеспечения / А. И. Холин // Научный лидер. — 2023. — № 18 (116). — С. 43–44.
5. Тихонов А. Г. Управление рисками при разработке программного обеспечения / А. Г. Тихонов, Т. Н. Субботина // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2022. — № 5–3 (87). — С. 122–125. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-5-3-122-125.
6. Макаров Д. А. О факторах риска в процессе разработки программного обеспечения / Д. А. Макаров, М. Я. Розенберг, А. Б. Шильников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. — 2009. — № 37 (170). — С. 85–92.
7. Волошин И. П. Факторы риска при разработке программного обеспечения / И. П. Волошин // Информационная безопасность регионов. — 2016. — № 3 (24). — С. 15–19.
8. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
9. Ныркoв А. П. Программно-аппаратная реализация системы предупреждения аварийной ситуации для объектов морского транспорта / А. П. Ныркoв, С. С. Соколов, А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Автоматизация в промышленности. — 2016. — № 2. — С. 56–60.

10. Mamunts D. Models and algorithms for estimation and minimization of the risks associated with dredging / D. Mamunts, S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, V. Kuznetsov // *Transport and Telecommunication*. — 2017. — Vol. 18. — No. 2. — Pp. 139–145. DOI: 10.1515/ttj-2017-0013.
11. Нырков А. П. Модели, алгоритмы и программное обеспечение минимизации рисков мультимодальных перевозок / А. П. Нырков, А. А. Нырков // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2013. — № 1 (20). — С. 67–73.
12. Nyrkov A. P. Hard- and Software Implementation of Emergency Prevention System for Maritime Transport / A. P. Nyrkov, A. A. Zhilenkov, S. S. Sokolov, S. G. Chernyi // *Automation and Remote Control*. — 2018. — Vol. 79. — Pp. 195–202. DOI: 10.1134/S0005117918010174.
13. Вихров Н. М. Анализ информационных рисков / Н. М. Вихров, А. П. Нырков, Ю. Ф. Каторин, А. А. Шнуренко, А. В. Башмаков, С. С. Соколов, Р. А. Нурдинов // *Морской вестник*. — 2015. — № 3 (55). — С. 81–85.
14. Veselkov V. Development of Methods to Identify Risks to Build up the Automated Diagnosis Systems / V. Veselkov, N. Vikhrov, A. Nyrkov, S. Chernyi, I. Titov // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2017. — Pp. 598–601. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910625.
15. Нырков А. П. Анализ и оценка рисков на водном транспорте / А. П. Нырков // Региональная информатика «РИ-2014»: Материалы XIV Санкт-Петербургской международной конференции. — СПб.: Санкт-Петербургское общество информатики, связи и управления, 2014. — С. 278–279.
16. Зак Ю. А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии / Ю. А. Зак. — М.: «ЛИБРОКОМ», 2013. — 352 с.
17. Function Point Counting Practices Manual. Release 4.2. — IFPUG, 2004.

REFERENCES

1. DeMarco, Tom, and Timothy Lister. *Waltzing With Bears: Managing Risk on Software Projects*. Dorset House, 2003.
2. Karetnikov, V. V., K. I. Efimov, and A. A. Sikarev. “To the question of risk assessment on domestic water transport of the Russian Federation.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2017): 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27.
3. Nyrkov, Anatoliy P., Yuri F. Katorin, Vagiz D. Gaskarov, Yana V. Kosyak, and Aleksandr V. Sauchev. “Aggregation process for implementation of application security management based on risk assessment.” *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2018. 98–101. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317039.
4. Kholin, A.I. “Main risks associated with software development.” *Nauchnyi lider* 18(116) (2023): 43–44.
5. Tikhonov, A.G., and T. N. Subbotina. “Risk management in software development.” *Economy and Business* 5–3(87) (2022): 122–125. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-5-3-122-125.
6. Makarov, D.A., M. Y. Rozenberg, and A. B. Shilnikov. “Risks in software development process.” *Bulletin of the South Ural State University, Series “Mathematical Modelling, Programming & Computer Software”* 37(170) (2009): 85–92.
7. Voloshin, I.P. “Risk factors in the development of software.” *Informatsionnaya bezopasnost' regionov* 3(24) (2016): 15–19.
8. Karetnikov, Vladimir V., Sergey V. Kozik, and Artem A. Butsanets. “Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
9. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, A. A. Zhilenkov, and S. G. Chernyi. “Programmno-apparatnaya realizatsiya sistemy preduprezhdeniya avariinoi situatsii dlya ob'ektov morskogo transporta.” *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 2 (2016): 56–60.
10. Mamunts, D., S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, and V. Kuznetsov. “Models and algorithms for estimation and minimization of the risks associated with dredging.” *Transport and Telecommunication* 18.2 (2017): 139–145. DOI: 10.1515/ttj-2017-0013.
11. Nyrkov, A. P., and A. A. Nyrkov. “Modeli, algoritmy i programnoe obespechenie minimizatsii riskov mul'timodal'nykh perevozk.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 67–73.

12. Nyrkov, Anatoliy P., A. A. Zhilenkov, S. S. Sokolov, and S. G. Chernyi. "Hard-and software implementation of emergency prevention system for maritime transport." *Automation and Remote Control* 79 (2018): 195–202. DOI: 10.1134/S0005117918010174.
13. Vikhrov, N. M., A. P. Nyrkov, Yu. F. Katorin, A. A. Shnurenko, A. V. Bashmakov, S. S. Sokolov, and R. A. Nurdinov. "Analiz informatsionnykh riskov." *Morskoi vestnik* 3(55) (2015): 81–85.
14. Veselkov, Viacheslav, Nikolai Vikhrov, Anatolii Nyrkov, Sergei Chernyi, and Ivan Titov. "Development of methods to identify risks to build up the automated diagnosis systems." *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2017. 598–601. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910625.
15. Nyrkov, A. P. "Analiz i otsenka riskov na vodnom transporte." *Regional'naya informatika "RI-2014". Materialy XIV Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi konferentsii*. SPb.: Sankt-peterburgskoe obshchestvo informatiki, svyazi i upravleniya, 2014. 278–279.
16. Zak, Yu. A. *Prinyatie reshenii v usloviyakh nechetkikh i razmytykh dannykh: Fuzzy-tehnologii*. M.: «LIBROKOM», 2013.
17. *Function Point Counting Practices Manual*. Release 4.2. IFPUG, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ястребов Иван Михайлович —
инженер по разработке ПО
ООО «ЯДРО ЦЕНТР ПРОГРАММНЫХ
РАЗРАБОТОК»
193376, Российская Федерация, Москва,
ул. Рочдельская, 15, стр. 15
e-mail: vanka998@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yastrebov, Ivan M. —
Software development engineer
YADRO SOFTWARE DEVELOPMENT CENTER,
LLC.
15 Rochdelskaya Str., Moscow, 193376,
Russian Federation
e-mail: vanka998@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15 ноября 2023 г.
Received: November 15, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129

STUDYING THE PROBLEM OF CONSTRUCTING AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM TO ENSURE THE SAFE PASSAGE OF UNMANNED VESSELS THROUGH SHIPPING LOCKS

A. A. Butsanets, N. M. Ksenofontov, T. A. Volkova

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

The option of introducing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels on inland waterways has been explored. An analysis of domestic and foreign scientific and technical literature was carried out to determine conceptual provisions that allow choosing a rational way of interaction of this system with known ones. It is noted that the automated ships locking control system should provide the necessary level of navigation safety, and the implementation of this system should not affect the operation of other subsystems and metasystems. Currently, cases of constructing such systems for automated mooring of unmanned vessels at navigational hydraulic structures are unknown. Therefore, based on the engineering-cybernetic approach, a list of provisions that contribute to the successful organization of research of a conceptual and operational nature has been formulated. Conceptual provisions for the synthesis of structure and factors that allow you to develop a rational version of the system structure to obtain the greatest efficiency and safety of its operation are proposed. In addition to the development of locking control systems, an equally important task is the creation of technical means in the lock chamber, the operation of which can ensure the required level of security. Therefore, the process of mooring an unmanned vessel to an automated mooring ring, for a utility model of which the authors of this study had received a patent, is theoretically described. To achieve the goal of formulating the problems of developing and constructing an automated locking control system, an analysis of mooring devices used at shipping locks, including abroad, which confirms that fixed and movable mooring devices with vacuum grips are currently used, is carried out. A review of scientific and technical literature on the use of automatic and automated mooring systems makes it possible to develop proposals for organizing an auto-mooring system of a shipping lock to ensure the unmanned vessels passage, as well as to formulate the main problems and tasks that must be solved to ensure the passage of both unmanned and ordinary vessels.

Keywords: unmanned vessel, shipping lock, automated mooring, ship pass, vacuum gripping device, navigation safety, floating ring.

For citation:

Butsanets, Artem A., Nikolay M. Ksenofontov, and Tamara A. Volkova. "Studying the problem of constructing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels through shipping locks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.

УДК 303.05; 656.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОПУСКА БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ ЧЕРЕЗ СУДОХОДНЫЕ ШЛЮЗЫ

А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, Т. А. Волкова

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

Исследован вариант внедрения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов на внутренних водных путях начиная с анализа отечественной и зарубежной научной и технической литературы для определения концептуальных положений, позволяющих выбрать рациональный способ взаимодействия данной системы с известными. Отмечается, что автоматизированная система управления шлюзованием судов должна обеспечивать необходимый уровень безопасности судоходства, и ее внедрение не должно влиять на работу иных подсистем и метасистем. В настоящее

время случаи построения таких систем автоматизированной швартовки для безэкипажных судов на судопропускных гидротехнических сооружениях неизвестны. Поэтому на основе инженерно-кибернетического подхода, сформулирован перечень положений, способствующих успешной организации исследований концептуального и операционного характера. Предложены концептуальные положения синтеза структуры и факторов, которые позволяют разработать рациональный вариант структуры системы для получения наибольшей эффективности и безопасности ее работы. В работе обращается внимание на то, что помимо разработки систем управления шлюзованием не менее важной задачей является создание технических средств в камере шлюза, работа которых сможет обеспечить необходимый уровень безопасности. Поэтому в работе теоретически описан процесс швартования безэкипажного судна к автоматизированному плавучему рыму, на полезную модель которого авторами данного исследования был получен патент. Для достижения цели по формулировке проблем разработки и построения автоматизированной системы управления шлюзованием выполнен анализ швартовных устройств, используемых на судоходных шлюзах, в том числе за рубежом, который является подтверждением того, что в настоящее время используются неподвижные и подвижные швартовные устройства с вакуумными захватами. Обзор научно-технической литературы об использовании автоматических и автоматизированных систем швартовки позволил разработать предложения по организации автошвартовочной системы судоходного шлюза для обеспечения пропуска безэкипажных судов, а также сформулировать основные проблемы и задачи, которые должны быть решены для обеспечения пропуска как безэкипажных, так и обычных судов.

Ключевые слова: безэкипажное судно, судоходный шлюз, автоматизированная швартовка, судопропуск, вакуумное захватное устройство, безопасность судоходства, плавучий рым.

Для цитирования:

Буцанец А. А. Исследование проблемы построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов через судоходные шлюзы / А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, Т. А. Волкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.

Введение (Introduction)

На водном транспорте, как и в других отраслях промышленности, проводятся мероприятия по автоматизации различных процессов, минимизирующих или полностью исключаящих участие человека. К ним, в частности, относятся проводимые научные исследования [1]–[4] и опытно-конструкторские работы по проектированию и внедрению безэкипажных судов (далее — БЭС)^{1, 2}. Актуальность внедрения таких судов подтверждена в том числе следующими нормативными правовыми актами:

– Постановлением Правительства Российской Федерации от 05.12.2020 № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации»;

– Государственной программой Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (федеральный проект «Автономное судовождение»), утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 29 марта 2019 г. № 377 (ред. от 22.10.2021).

Одним из факторов, ограничивающих повсеместное внедрение БЭС на внутренних водных путях РФ, является их безопасная проводка через судопропускные сооружения — судоходные шлюзы. Несмотря на наличие высокой автоматизации управления процессом шлюзования существуют операции, требующие непосредственного физического участия человека, такие, например, как швартовка судна в камере шлюза для обеспечения его безопасного прохода через сооружение. Данная операция является весьма трудоемкой и выполняется, как правило, членами экипажа шлюзуемого судна за подвижные (плавучие рымы) или неподвижные (причальные тумбы, кнехты, рымы) швартовные устройства. При этом известны случаи получения травм членами экипажа при несоблюдении техники безопасности во время швартовки судна в камере шлюза.

¹ https://gumrf.ru/news2020/4/news_290920_2.html

² https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Sitronics_KT:%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%28%D0%90%D0%9D%D0%A1%29

Следует отметить, что в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59284–2020 «Суда безэкипажные технического флота. Общие требования» сооружения, принимающие и обеспечивающие работу автономного флота, должны быть оснащены средствами, в том числе позволяющими проводить швартовные операции в автоматическом и / или дистанционном режиме. Также, согласно положениям данного стандарта, шлюзы должны быть оборудованы станциями внешнего управления для обеспечения безопасного шлюзования в том числе в дистанционном режиме управления. Кроме того, в новой редакции СП 101.13330.2023 «СНиП 2.06.07–87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» отмечается, что при проектировании шлюза следует предусматривать в том числе автошвартовные устройства (далее — АШУ), которые отсутствуют не только на эксплуатируемых, но и не предусмотрены проектом на строящихся и реконструируемых сооружениях. Таким образом, одним из препятствий для полноценного внедрения и работы БЭС на внутренних водных путях РФ является отсутствие автоматизации их шлюзования. По нашему мнению, устранением этого препятствия является внедрение устройств, позволяющих осуществлять автоматизированную или автоматическую швартовку (автошвартовку), которая должна отвечать в том числе следующим требованиям:

- полное исключение ручного труда при швартовке судна в камере шлюза;
- конструкция АШУ не должна уменьшать полезные габариты камеры шлюза;
- уровень надежности АШУ не должен уступать существующим швартовным устройствам;
- автошвартовка не должна увеличивать общее время судопропуска.

Таким образом, целью данного исследования является выявление и формализация проблем построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов через судоходные шлюзы. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ швартовных устройств, используемых на судоходных шлюзах.
2. Сбор и анализ данных о применяемых автошвартовных устройствах, а также автоматических и автоматизированных системах швартовки.
3. Разработка предложений по организации автошвартовной системы судоходного шлюза для обеспечения пропуска безэкипажных судов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

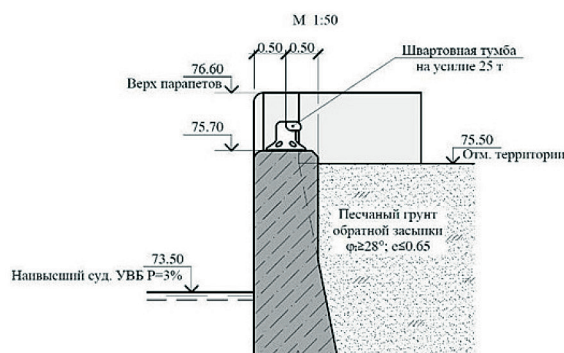
Швартовные устройства входят в состав вспомогательного механического оборудования судоходного шлюза. В связи с этим к ним предъявляются такие же общие требования, как и к другим элементам механического оборудования, а именно [5], [6]: надежность при любых условиях эксплуатации, характеризующаяся безотказностью, ремонтпригодностью, долговечностью и сохраняемостью, удобство эксплуатации, экономичность и техническая безопасность. В качестве швартовных устройств судоходных шлюзов сводом правил СП 101.13330.2023 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» предусмотрены следующие их виды: причальные тумбы, автошвартовные устройства, подвижные или неподвижные рымы.

Описание конструктивного оформления причальных (швартовных) тумб (рис. 1), а также подвижных и неподвижных рымов (рис. 2) приведено в источниках [6]–[11]. Следует отметить отсутствие в указанных источниках единообразия в терминологии и в достаточной степени проработанности требований и подходов к проектированию швартовных устройств шлюзов.

Проработка вопроса внедрения АШУ на судоходные шлюзы активно велась отечественными специалистами, в том числе сотрудниками ЛИВТа. Например, в исследованиях В. П. Бутина приведены результаты анализа наиболее известных разработок подобных устройств, а именно [12]:

- швартовка сеткой с подхватом судов под днище;
- автосчалка с выдвижными прижимными колесами;
- клешневой захват с замковым механизмом;
- швартовный манипулятор с шарнирно-рычажным механизмом;
- электромагнитное швартовное устройство;
- вакуумное швартовное устройство.

а)



б)



Рис. 1. Неподвижное швартовное устройство в виде швартовной тумбы:

а — схема установки швартовной тумбы на строящемся шлюзе Красногорского гидроузла;
б — общий вид швартовной тумбы Нижне-Свирского шлюза ФБУ «Администрация «Волго-Балт»
(Фото из личного архива авторов)



Рис. 2. Плавающий рым в камере шлюза
(Заимствовано из общедоступных ресурсов интернета)

Следует отметить, что по совокупности рассмотренных функциональных и технологических факторов наиболее эффективным, по мнению В. П. Бутина, является вакуумное швартовное устройство, испытания опытных образцов которого, выполненных на основе на плавучих рымах, были успешно проведены в 1970–1980-х гг.^{1,2,3} на шлюзах и причальных сооружениях в подходных каналах Волго-Балтийского водного пути (рис. 3 и 4) и Волго-Донского судоходного канала.

В результате проведения лабораторных и натурных испытаний была доказана работоспособность автошвартовных вакуумных устройств и даны рекомендации по их дальнейшему совершенствованию. Однако, из-за отсутствия заинтересованности на тот момент со стороны эксплуатирующих организаций и Главводпути, дальнейшего развития данные системы не получили. В зарубежной практике разработка подобных систем для шлюзов началась в 2004–2005 гг. группой компаний Cavotec для сооружений, расположенных на морском пути Святого Лаврентия в Канаде [13]. В 2006 г.

¹ Натурные испытания опытных образцов гидравлического вакуумного швартовного устройства на шлюзе № 1 Волго-Балтийского канала [Текст]: отчет о НИР; рук. В. Л. Шведов. Л.: ЛИВТ, 1975. 38 с.

² Экспериментальное исследование опытного образца автоматических швартовных устройств на одном из шлюзов Северо-Западного бассейна [Текст]: отчет о НИР; рук. В. Л. Шведов. Л.: ЛИВТ, 1975. 36 с.

³ Натурные испытания автоматических швартовых устройства причалах шлюзов ВБВП им. В. И. Ленина и лабораторные исследования модели устройства для камер шлюзов: отчет о НИР; рук. В. Л. Шведов. Л.: ЛИВТ, 1978. 43 с.

данной организацией началось изготовление прототипа автошвартовного устройства, предназначенного для работы на судоходном шлюзе.

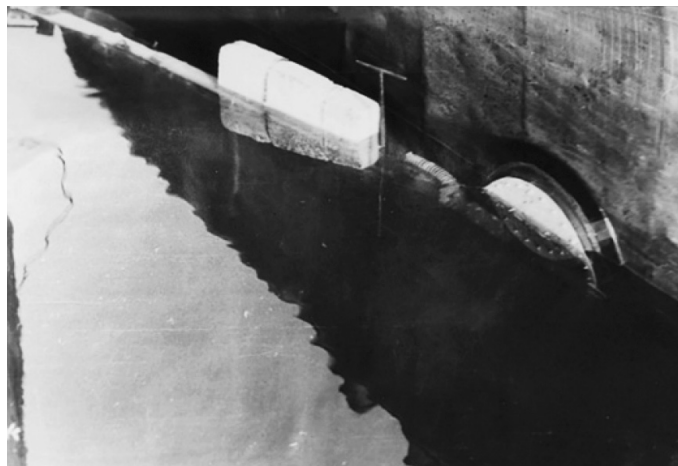


Рис. 3. Испытания автошвартовного устройства на Волховском шлюзе

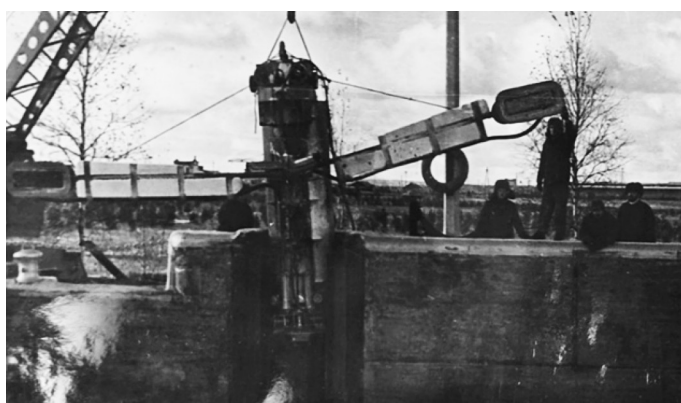


Рис. 4. Испытания автошвартовного устройства на шлюзе № 1 Волго-Балтийского водного пути

Экспериментальный образец был основан на традиционной конструкции плавучего рыма, на верхнюю часть которого устанавливалось одинарное вакуумное швартовное устройство по аналогии с отечественными разработками. В горизонтальной плоскости устройство могло выдвигаться на 850 мм за лицевую грань стенки камеры шлюза для стыковки с судном. Для проведения приемочных испытаний в начале 2007 г. образец вакуумного швартовного устройства был установлен на одном из шлюзов Уэллендского канала в Канаде (рис. 5, а). В результате проведения натурных испытаний была подтверждена возможность использования таких устройств и установлена необходимость внесения некоторых доработок, которые следовало внести в конструкцию.

В дополнение к испытаниям в 2008 г. на другом шлюзе этого же канала были установлены два таких устройства для оценки перемещений судна во время шлюзования (рис. 5, б). Для этого каждое из этих устройств оснастили системой непрерывного контроля нагрузки. Полученные данные свидетельствовали о том, что для нормального удержания судна двух швартовных устройств недостаточно.

Помимо увеличения количества швартовных устройств было принято решение об их оснащении электроприводом. Также потребовалось решение проблем, связанных с различными габаритами шлюзуемых судов и возникновением обратной волны в камере шлюза. Еще одним усовершенствованием была установка на одном устройстве двух вакуумных подушек вместо одной.

а)



б)



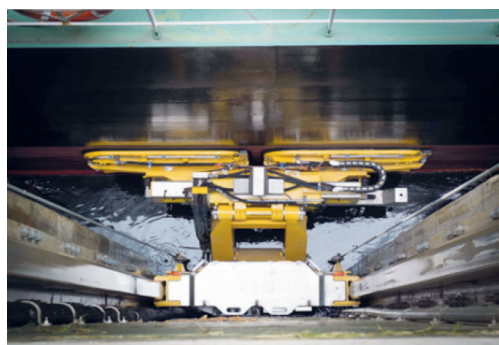
Рис. 5. Испытания вакуумного автошвартовного устройства на шлюзах Уэллендского канала в Канаде:

а — на базе плавучего рыма (2007 г.);

б — в качестве самостоятельного устройства, оснащенного электроприводом
(Заимствовано из общедоступных ресурсов интернета)

Результатом проведения натурных исследований стало внедрение автоматизированной швартовной системы, построенной на вакуумном устройстве на шести шлюзах Уэллендского канала (часть морского пути Святого Лаврентия) в Канаде (рис. 6). Такая же система была установлена на шлюзах Эйзенхауэр и Снелл (США), также входящих в состав данного морского пути. Вакуумные швартовные устройства на указанных сооружениях установлены на одной стороне камеры в количестве трех единиц. Данное количество устройств определено исходя из габаритных параметров шлюзуемого флота. Расстояние между устройствами составляет 25 м. Работы по установке данных систем проводились в 2014–2019 гг. Стоимость установки системы варьировалась от 2,4 до 3,4 млн канадских долл. (примерно 170–250 млн руб. по текущему курсу).

а)



б)



Рис. 6. Общий вид эксплуатируемых вакуумных автошвартовных устройств на шлюзах Уэллендского канала в Канаде и США:

а — вид сверху; б — вид спереди

(Заимствовано из общедоступных ресурсов интернета)

Установке автошвартовных систем предшествовала разработка и внедрение на указанных сооружениях системы позиционирования судна в камере шлюза (рис. 7). Данная система построена на лазерных датчиках, установленных на обеих головах камер шлюзов, сканирующих движущееся судно и формирующих трехмерную модель. Данная система позволяет судоводителю визуально оценить местоположение судна в камере и расстояние до швартовных устройств. Алгоритмы зрения разработаны для точного определения передней точки носовой оконечности для судов разной формы, высоты и цветового оттенка. Положение судна в камере динамически обновляется и отображается на светодиодных панелях по мере его продвижения до конечной точки для швартовки.

Визуальное представление информации при этом дублируется голосовым сообщением через автоматизированную систему радиопередачи.



Рис. 7. Система позиционирования судна в камере шлюза для обеспечения автошвартовки
(Заимствовано из общедоступных ресурсов интернета)

Внедрение рассмотренных систем позволило увеличить пропускную способность шлюзов за счет сокращения времени, затрачиваемого на швартовку. При этом необходимо отметить, что на строящихся и реконструируемых морских и речных шлюзах, подобных рассмотренным, в зарубежных странах, таких как США, Нидерланды, Германия и Китай, данные системы не устанавливаются. По мнению зарубежных экспертов, дальнейшее внедрение данных устройств на судопропускных сооружениях требует технико-экономического обоснования с учетом их высокой стоимости изготовления, монтажа и эксплуатации. Следует также иметь в виду, что на момент внедрения АШУ на судоходных шлюзах Канады и США подобные системы уже были разработаны и установлены на некоторых причальных сооружениях. Примером может служить электромагнитная система автошвартовки DOCKLOCK Нидерландской фирмы Mampae Offshore Industries, а также вакуумные системы автошвартовочных устройств AutoMoor шведской компании Trelleborg и MoorMaster от группы компаний Cavotec, описание которых приведено в работе [14].



Рис. 8. Вакуумное автошвартовочное устройство, установленное на причальном сооружении
(Заимствовано из общедоступных ресурсов интернета)

В настоящее время АШУ этих производителей установлены в портах многих стран, в том числе Финляндии, Эстонии, Дании, Нидерландах, Новой Зеландии, Великобритании и Австралии. При этом следует обратить внимание, что на многих причальных сооружениях данные устройства практически не задействованы, и швартовка судов осуществляется с помощью членов экипажа и швартовных бригад порта. Несмотря на существующие недостатки разработка и внедрение автошвартовных устройств (рис. 8) и систем их управления продолжается.

Результаты (Results)

В России и за рубежом неизвестны случаи построения систем автоматизированной швартовки для БЭС на судопропускных гидротехнических сооружениях. Учитывая, что одной из задач исследования является разработка предложений по организации автошвартовной системы судоходного шлюза для обеспечения пропуска безэкипажных судов вначале целесообразно рассмотреть такую систему с позиции БЭС и судоходного шлюза. В предполагаемой ситуации с позиции БЭС в общем виде предполагаются следующие действия. Судно при подходе к гидротехническому сооружению устанавливает связь с Центром управления автоматизированными швартовными устройствами (ЦУАШУ), сообщая о себе следующую информацию: наименование судна, данные о курсе, скорости движения и текущем навигационном статусе, технические характеристики (если характеристики не заложены в базу данных ЦУАШУ) и другие сведения, необходимые для безопасного шлюзования. ЦУАШУ в свою очередь должно подтвердить, что связь установлена, информация принята и на основании выполненных расчетов и заложенных алгоритмов сообщить БЭС время шлюзования и точные координаты месторасположения носа и кормы в случае крупных судов, для которых должны использоваться два или более захватывающих устройств (пассажирские и грузовые, смешанные). Для маломерных судов (например, катеров и яхт, длина корпуса которых менее 20 м) может быть достаточно одного захватного устройства и тогда сообщаются координаты швартовного устройства, а БЭС выбирает точное местоположение корпуса для стыковки по своему усмотрению.

При подходе судна к АШУ и занятии корректной позиции, которая должна определяться с учетом сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), желательно с RTK-поправками для сантиметровой точности, начинается работу швартовное устройство. Пример такого устройства, для которого был получен патент на полезную модель [15], приведен на рис. 9. В момент подхода судна АШУ находится в режиме готовности начать швартовку. Данный режим обеспечивается настройкой программного обеспечения при определенных положениях плавучего АШУ в камере шлюза по высоте: в наивысшей точке (при наполненной камере) и низшей (когда камера опорожнена).

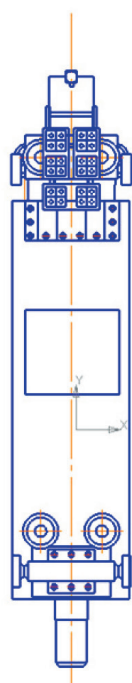
Видеокамера и дальномер фиксируют сближение площадки вакуумных присосок и корпуса судна. Затем с помощью пневмоцилиндра осуществляется вынос контактной площадки в сторону корпуса судна. Одновременно насос начинает откачку воздуха через сопла, установленные на контактной площадке. Поскольку корпуса судов имеют различные геометрические формы, контактная площадка предусматривает две вертикальные площадки и одну горизонтальную для оптимального примыкания к поверхности и крепкой сцепки с корпусом судна. Кроме того, на каждой площадке расположено восемь независимых сопел для откачки воздуха с резиновым ограничителем. Таким образом, контактная площадка состоит из 24 независимых контактных точек, независимость которых заключается в том, что на каждой из них установлен датчик массового расхода воздуха и автоматический клапан, перекрывающий отсос воздуха.

В процессе откачки воздуха во время швартовки судна при достижении заданных параметров разности между соседними соплами ЦУАШУ перекрывает откачку воздуха из данного сопла. Например, во время швартовки геометрия корпуса судна позволила обеспечить только шесть из восьми точек примыкания на одной пластине, датчики расхода воздуха фиксируют существенный расход воздуха только из двух сопел, а в остальных шести соплах расход существенно снизился.

На основании этого ЦУАШУ делает вывод о том, что дальнейшая откачка воздуха нецелесообразна и закрывает клапаны двух сопел, тем самым нагнетая необходимый уровень вакуума. После фиксации судна к АШУ камера шлюза по команде начинает опорожняться или наполняться водой до заданного состояния (если устройство находилось внизу, то до окончания поднятия, если наверху, то до окончания спуска).

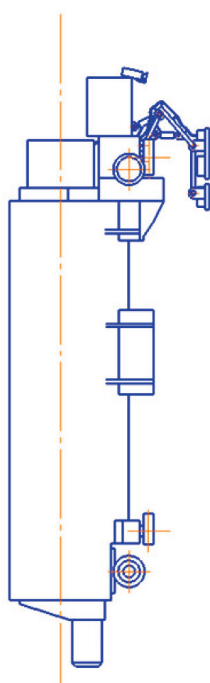
После установления необходимого уровня воды, через заданное время, т. е. необходимое для открытия ворот шлюзовой камеры, ЦУАШУ открывает подачу воздуха в сторону контактной площадки, вакуумное пространство заполняется воздухом и корпус судна освобождается от зацепления. Освобожденное от захвата судно выходит из камеры шлюза.

а)



Вид спереди

б)



Вид сбоку



Рис. 9. Концептуальное изображение конструкции автошвартовного плавучего рыма (а) и патент на полезную модель (б)

Автошвартовное устройство является сложной технической системой, включающей множество элементов, для управления которыми необходима разработка и организация системы управления, интегрированная в систему управления процессом шлюзования. Для разработки сложных технических устройств и систем допустимо использование инженерно-кибернетической методологии, в которой на концептуальном уровне предусмотрен инструментарий для синтеза новой системы в имеющуюся, что, в свою очередь, позволяет сформулировать принципы построения и функционирования автошвартовной системы для обеспечения безопасности судоходства. Исследование систем третьего методологического уровня базируется на системной инженерно-кибернетической методологии, которая может служить способом реализации системного подхода в исследовании проблемы эффективности организационно-технических элементов [16], суть которого заключается в том, что система третьего уровня рассматривается в виде составной части метасистемы, качества элементов которой связаны друг с другом. Системный инженерно-кибернетический подход объединяет исследования третьего и четвертого методологических уровней, используемых на организационном этапе решения задач (рис. 10 [16] и таблица).

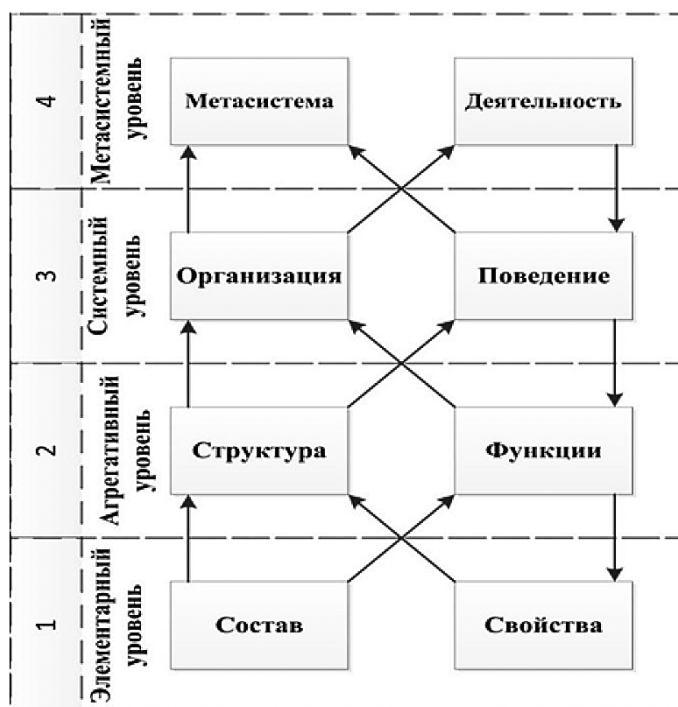


Рис. 10. Уровни анализа системы

Уровни организации автошвартовой системы шлюза

Метасистемный уровень	Метасистема		Деятельность
	Система управления шлюзом, автошвартовая система		Обеспечение безопасности судоходства и управление транспортным процессом
Системный уровень	Организация		Поведение
	Организация управления, мониторинга и контроля шлюзования		Человек-машина, машина-машина
Агрегативный уровень	Структура централизованная		Функции: управление, мониторинг, контроль
Элементарный уровень	Состав		Свойства
	Центр управления автоматизированными швартовными устройствами	Человек	Целостность, упорядоченность, взаимосвязь структуры и среды, эмерджентность, гомеостазис
		Приборы и устройства	Целостность, иерархичность, упорядоченность, множественность, эмерджентность
		Средства связи	Целостность, иерархичность, множественность
		Комплекс управления	Иерархичность, множественность, взаимосвязь структуры и среды, гомеостазис
		Система идентификации	Множественность
		Датчики информации	Множественность, взаимосвязь структуры и среды

В случае если автошвартовой системе шлюза необходимо выполнить целевую функцию по захвату судна, можно построить шаги управления со стороны ЦУАШУ, разделив их на следующие четыре этапа:

1-й этап — определение положения судов для выполнения шлюзования и швартовки;

2-й этап — подход судна в камере шлюза к определенному швартовному устройству или нескольким;

3-й этап — захват и удержание судна;

4-й этап — определение очередности и последующая отшвартовка судна.

ЦУАШУ относится к классу автоматизированных систем, поэтому ее функционирование может происходить как под управлением человека для классических судов, так и полностью в автоматическом режиме для безэкипажных судов.

На первом этапе необходимо определять приоритетность шлюзования судов. Здесь следует учитывать, что БЭС передают информацию о себе в автоматическом режиме, а для классических судов необходимо предусмотреть способы взаимодействия с ЦУАШУ. На втором этапе, после того как очередность определена и камера шлюза готова к приему судов, может быть реализован подход судов в камере шлюза к определенному швартовному устройству. Для осуществления этого необходимо достаточно точно позиционировать корпус судна напротив заданного устройства. Кроме того, в автошвартовной системе необходимо предусмотреть учет размеров корпуса судна для определения необходимого количества швартовных устройств в целях обеспечения безопасности судоходства. На третьем этапе, после корректного позиционирования корпуса судна, швартовное устройство осуществляет захват и удержание корпуса судна. Здесь важно предусмотреть наличие достаточного количества вакуумных присосок и наличия датчиков контроля захвата с системой предупреждения в случае недостаточного удерживающего усилия для осуществления безопасного шлюзования. На заключительном четвертом этапе важно предусмотреть очередность выхода судов для обеспечения безопасности судоходства. Например, вначале отключить захват для малых судов, затем крупных или отцеплять суда в порядке их расстановки в камере шлюза.

Для повышения безопасности шлюзования целесообразно использовать систему визуализации, работающую в реальном масштабе времени. Для передачи телеметрии (параметров движения) и команд управления необходимо обеспечить надежные помехозащищенные радиоканалы с пропускной способностью, достаточной для передачи больших объемов информации, снимаемой с датчиков, а также сигнала визуализации. При этом трафик не должен создавать помех для радиообмена и работы радиосистем. Выбор конкретного частотного диапазона, конкретных схем реализации приемопередатчиков осуществляется на четвертом (элементарном) уровне анализа системы, при проектировании автошвартовной системы для конкретных судоходных гидротехнических сооружений.

Важное значение для поддержания высокого уровня безопасности судоходства имеет обязательная идентификация устройств друг с другом, исключающая возможность использования системы неподготовленными лицами или взломщиками, а также использование технически неисправных, не имеющих допуска. Исходя из рассмотренной концепции построения, автошвартовная система должна содержать следующие элементы: модуль идентификации, модуль контроля, модуль аутентификации, интерфейс обмена данными между модулями, модуль датчиков, модуль визуализации, модуль обработки и передачи информации, модуль приборов и устройств.

В результате разработки схемы действий БЭС и ЦУАШУ (рис. 11) и с учетом сформулированной концепции построения было установлено, что существует ряд проблем, которые необходимо решить для осуществления процесса автоматизированной швартовки в камере шлюза. В процессе работы были формализованы некоторые задачи, требующие всестороннего анализа и поэтапного решения следующих вопросов:

- информационное взаимодействие центра управления с судном и судопропускным сооружением;
- управление автошвартовными устройствами;
- расчет удержания присосками судна с учетом способа наполнения и опорожнения камеры шлюза;

- расчет оптимального территориального и количественного расположения швартовных устройств с учетом их востребованности;
- расчеты и алгоритмы оптимизация судопропуска с учетом приоритетности;
- разработка модель расчета усилий для удержания конкретного судна;
- расчет пропускной способности.

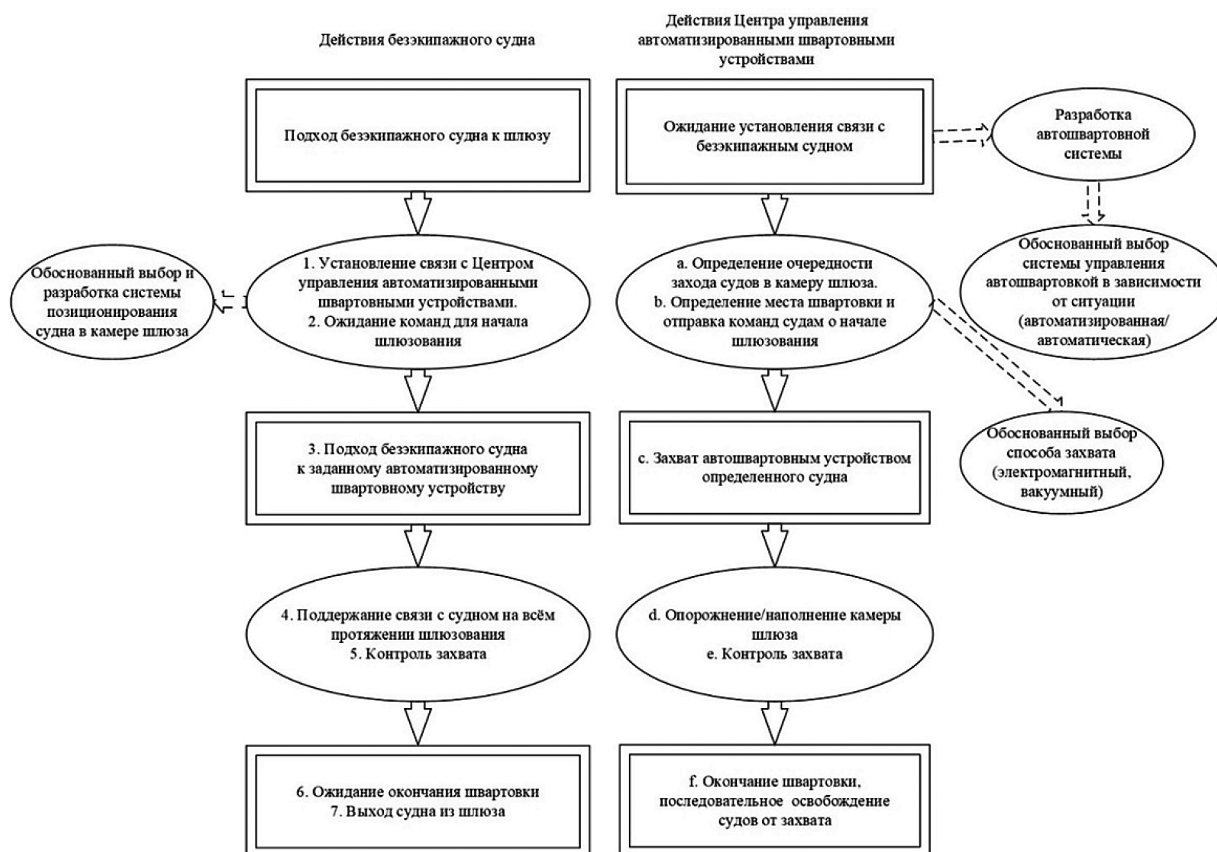


Рис. 11. Концептуальная схема действий БЭС и Центра управления автоматизированными швартовными устройствами и задачи для их построения

Перечень указанных задач не расценивается авторами исследования как исчерпывающий, поскольку требует дальнейшей проработки по мере усовершенствования в процессе исследования проблем построения автоматизированной системы управления швартовных устройств, систем и ЦУАШУ. Следует отметить, что в работе намеренно использован термин «автоматизированная швартовка», несмотря на то, что по некоторым признакам ее можно признать автоматической, поскольку здесь в явном виде не предусмотрена работа оператора системы. Это обусловлено тем, что даже полностью автоматическая система на таких важных объектах должна функционировать под контролем человека до тех пор, пока не будет полной уверенности в отсутствии аварийных ситуаций.

Заключение (Conclusion)

В области внутреннего водного транспорта на территории Российской Федерации формируется сложная эргатическая иерархическая система с автоматизированным управлением: единая система контроля и управления судоходством, находящаяся на первом (главенствующем) уровне, благодаря которой появляется возможность осуществлять мониторинг и контроль всех участников транспортного процесса [17], [18]. На втором уровне находятся региональные информационные службы (РИС) мониторинга судоходства, являющиеся подсистемами единой системы контроля

и управления судоходством. На третьем уровне иерархической системы находятся подсистемы РИС: локальные системы управления движением судов (СУДС) и автоматизированные системы управления движением судов (АСУ ДС), а системы типа автошвартовых будут являться подсистемами СУДС или АСУ ДС. Рассматриваемые в работе системы рассматриваются как подсистемы для СУДС или АСУ ДС.

Поскольку целью выполнения исследования, описанного в данной статье является исследование проблем построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов через судоходные шлюзы. Для достижения этой цели был выполнен анализ швартовых устройств, используемых на судоходных шлюзах, который подтвердил, что в данный момент для обеспечения безопасности шлюзования применяются неподвижные и подвижные швартовые устройства. Обзор научно-технической литературы об автоматических и автоматизированных системах швартовки позволил разработать предложения по организации автошвартовой системы судоходного шлюза для обеспечения пропуска безэкипажных судов, а также сформулировать основные проблемы и задачи, которые должны быть решены для обеспечения пропуска как безэкипажных, так и обычных самоходных транспортных судов.

Разработка подобного рода систем направлена на повышение эффективности функционирования и развития водного транспорта, что невозможно без внедрения современных технологий в области микроэлектроники, вычислительной техники, радионавигации, связи и в других смежных областях. С помощью компонентов и комплексов программного, технического и информационного обеспечения можно создавать различные системы управления судоходством, которые в перспективе станут частью интеллектуальной транспортной системы Российской Федерации.

Благодарности

Данная статья выполнена в рамках научно-исследовательской работы по теме «Выполнение исследований для определения оптимального технического решения по автоматизации швартовых операций классических и беспилотных судов на судоходных шлюзах» (Приказ от 28.08.2023 № 908).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Триполец О. Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
2. Каретников В. В. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
3. Каретников В. В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.
4. Буцанец А. А. Разработка предложений по типовой структуре системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом / А. А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 100–103.
5. Полонский Г. А. Механическое оборудование гидротехнических сооружений: учебник для техникумов / Г. А. Полонский. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1982. — 352 с.
6. П-864–88. Пособие по проектированию судоходных шлюзов к СНиП 2.06.07–87 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения». — М.: Гидропроект, 1988. — 352 с.
7. Михайлов А. В. Судоходные шлюзы / А. В. Михайлов. — М.: Транспорт, 1966. — 532 с.
8. Ярустовский А. А. Механическое оборудование шлюзов / А. А. Ярустовский. — М.: Транспорт, 1967. — 224 с.
9. Онохов П. П. Механическое оборудование шлюзов и судоподъемников / П. П. Онохов. — М.: Транспорт, 1973. — 184 с.

10. Колосов М. А. Механическое оборудование судоходных шлюзов / М. А. Колосов, П. А. Гарибин. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 148 с.
11. Семанов Н. А. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
12. Бутин В. П. Автоматизация швартовки судов при их шлюзовании / В. П. Бутин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 3. — С. 31а-42.
13. Kwok S. New innovative concepts for navigation locks / S. Kwok // 2nd International Workshop, PIANC. — New-Orleans, 2011.
14. Андреева М. В. Современные методы автоматизации швартовки морских судов / М. В. Андреева // Научные исследования XXI века. — 2022. — № 3 (17). — С. 18–23.
15. Пат. 221649 Российская Федерация, МПК E02C 1/10, E02B 3/20, B63B 21/00. Швартовное устройство камеры шлюза / А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, К. В. Калюжный; заяв. и патентобл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — № 2023125103; заявл. 29.09.2023; опубл. 15.11.2023, Бюл. № 32.
16. Буцанец А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судоходство» / Артем Александрович Буцанец. — СПб.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», 2021. — 189 с.
17. Каретников В. В. Некоторые аспекты создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. И. Меншиков, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 222–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-222-229.
18. Рудых С. В. Системы мониторинга и управления судами технического и вспомогательного флота на внутренних водных путях России: дис. ... д-р техн. наук: 05.13.06. / Сергей Витальевич Рудых. — СПб., 2013. — 308 с.

REFERENCES

1. Tripolets, Oleg Y. “Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.4 (2021): 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
2. Karetnikov, Vladimir V., Ivan V. Pashchenko, and Andrei I. Sokolov. “Prospects of introducing unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.3 (2017): 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
3. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh, and A. A. Butsanets. “On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.
4. Butsanets, A. “Proposals development for the typical structure of a remote control system for unmanned technical fleet.” *Transport business of Russia* 4 (2019): 100–103.
5. Polonskij, G. A. *Mehanicheskoe oborudovanie gidrotehnicheskikh sooruzhenij*. 3^d edition. M.: Jenergoizdat, 1982.
6. *Posobie po proektirovaniyu sudohodnyh shljuzov k SNI P 2.06.07–87 «Podpornye steny, sudohodnye shljuzy, rybopropusknye i rybozashhitnye sooruzhenija»*. M.: Gidroproekt, 1988.
7. Mihajlov, A. V. *Sudohodnye shljuzy*. M.: Transport, 1966.
8. Jarustovskij, A. A. *Mehanicheskoe oborudovanie shljuzov*. M.: Izdatel'stvo «Transport», 1967.
9. Onohov, P. P. *Mehanicheskoe oborudovanie shljuzov i sudopod#emnikov*. M.: Izdatel'stvo «Transport», 1973.
10. Kolosov, M. A., and P. A. Garibin. *Mehanicheskoe oborudovanie sudohodnyh shljuzov*. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2017.
11. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudohodnye kanaly, shljuzy i sudopod#emniki*. M.: Izdatel'stvo «Transport», 1970.
12. Butin, V. P. “Automation of the mooring of ships during their locking through.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 3 (2010): 31a-42.
13. Kwok, S. “New innovative concepts for navigation locks.” *2nd International Workshop, PIANC*. New-Orleans, 2011.

14. Andreeva, M. V. "Modern methods of approach to berthing and automatization of mooring of sea vessels." *Nauchnye issledovaniya XXI veka* 3(17) (2022): 18–23.

15. Butsanets, A. A., N. M. Ksenofontov, and K. V. Kalyuzhnyy. RU 221 649 U1, IPC E02C 1/10, E02B 3/20, B63B 21/00. Shvartovnoye ustroystvo kamery shlyuza. Russian Federation, assignee. Publ. 15 Nov. 2023.

16. Butsanets, A. A. Organizatsiya sistemy distantsionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskim flotom dlya obespecheniya sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh: PhD diss. SPb.: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2021.

17. Karetnikov, Vladimir V., Aleksandr I. Menshikov, and Sergey V. Rudy'kh. "Some aspects of creating a telecommunication automated system for organizing the vessels traffic on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 222–229. DOI: 10.21821/2309–5180–2019–11–2–222–229.

18. Rudykh, S. V. Sistemy monitoringa i upravleniya sudami tekhnicheskogo i vspomogatel'nogo flota na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossii. Dr. of Technical Sciences Diss. SPb., 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Ксенофонт Николай Михайлович —

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

Волкова Тамара Александровна —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Butsanets, Artem A. —

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

Ksenofontov, Nikolay M. —

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

Volkova, Tamara A. —

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

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.

Received: November 23, 2023.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 15. № 6

2023 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.12.23. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 26,75. Тираж 500 экз. Заказ № 771/23

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7