

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

ВЕСТНИК

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

Том 16. № 2

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2024. — Т. 16. — № 2. — 154 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

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

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

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

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

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

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

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

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



ISSN 2309-5180



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

Гл. редактор

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

Зам. гл. редактора

А. П. 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 181**

Гладков Г. Л., Ржаковская П. С., Заварзин Р. В. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустановившемся движении воды 181

Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Силина А. А. Моделирование работы морского пассажирского порта на основе цифровой транспортной модели с учетом различных приоритетов круизных и паромных судов 197

Васьков А. С., Мироненко А. А. Метод решения уравнений изостатий 212

Тырва В. О., Бова Е. В., Румянцев А. Ю. Шаблоны антропоморфного управления движением судна: конструирование и применение 224

Замышляев В. И. Соотношения между параметрами донных гряд при аппроксимации их продольного сечения треугольником 236

Триполец О. Ю. Анализ эффективности применения нейронной сети в прогнозировании маневров расхождения двух судов 251

Чабак А. А. Обзор актуальных алгоритмов по оптимизации маршрутов автономных судов 259

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 271**

Красюк А. Б. Прогнозирование объема дефектационных работ корпуса речного судна 271

Цветков Ю. Н., Вихров Н. М., Фиактистов Я. О. Влияние добавки бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе 282

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) 290

Гаврилов В. В., Мащенко В. Ю., Жуков В. А. Повышение качества анализа тепловыделения в судовом дизеле за счёт уточнения положения верхней мёртвой точки поршня 290

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Энергоэффективность судов современного коммерческого флота: инструменты регулирования и методы достижения 301

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ 318

Чертков А. А., Каск Я. Н., Терентьев В. Е. Алгоритм оценки параметров дискретно-динамической модели функции потребления при помощи нейронной сети средствами MATLAB 318

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 181

Gladkov G. L., Rzhakovskaya P. S., Zavarzin R. V. Experimental studies of flow hydraulics and bedload transport parameters in unsteady flow 181

Maierov N. N., Fetisov V. A., Silina A. A. Simulation of sea passenger port operation on the basis of a digital transport model taking into account different priorities of cruise and ferry vessels..... 197

Vas'kov A. S., Mironenko A. A. Method for solving the isostage equations..... 212

Tyrva V. O., Bova E. V., Rumyantsev A. Y. Templates of ship movement anthropomorphic control: design and application..... 224

Zamyshlyayev V. I. Relationships between river dune parameters when approximating their longitudinal profile by a triangle 236

Tripolets O. Y. Analysis of the neural network application effectiveness in predicting collision avoidance maneuvers for two vessels..... 251

Chabak A. A. Overview of current algorithms for autonomous vessels route optimization 259

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 271

Krasiuk A. B. Forecasting the volume of defect detection works on a river fleet vessel hull 271

Tsvetkov Y. N., Vihrov N. M., Fiaktistov Y. O. Influence of the bronze powder filler on the adhesion of epoxy compound to aluminum bronze..... 282

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 290

Gavrilov V. V., Mashchenko V. Yu., Zhukov V. A. Improving the quality of heat dissipation analysis in marine diesel by clarifying the upper dead center position of the piston 290

Volume 16. № 2

2024

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

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

Members of the editorial board:

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

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

O. K. Bezyukov,
Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,
Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,
Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,
Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,
Doctor of Technical Sciences

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

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

M. A. Kolosov,
Doctor of Technical Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

V. B. Chistov,
Doctor of Technical Sciences

<i>Zhivljuk G. E., Petrov A. P.</i> Energy efficiency of modern commercial fleet vessels. Regulatory tools and methods of achievement.....	301
AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	318
<i>Chertkov A. A., Kask Ya. N., Terentiev V. E.</i> Algorithm for estimating the parameters of a discrete-dynamic consumption function using a neural network by MATLAB	318

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196

EXPERIMENTAL STUDIES OF FLOW HYDRAULICS AND BEDLOAD TRANSPORT PARAMETERS IN UNSTEADY FLOW

G. L. Gladkov¹, P. S. Rzhakovskaya¹, R. V. Zavarzin^{1,2}

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

² — State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The results of experimental studies of water flow characteristics and sediment transport parameters carried out in a hydraulic flume with a sandy deformable bottom under steady and unsteady water flow conditions are considered in the paper. The experiments were carried out in the hydraulic flume 8.0 meters long and 0.21 meters width. The flume is equipped with devices for changing the bottom slope in the range of values: straight — up to 0.025, reverse — up to 0.015, as well as for automatic reproduction of the flow hydrograph according to a given program. The range of flow rates in the experiments varied in the range from 2.0 to 6.0 l/s. Quartz sand with a diameter of 0.1 to 0.3 mm was used as channel material. The intensity values of changes in the main characteristics of the river flow during the propagation of wave are determined in the work; and this intensity including the nature of changes in the level regime and slopes of the free surface, as well as the regime of water flow velocities, is evaluated. The parameters of bedload transport including the length and height of dunes, the speed of dunes movement and the sediments flow rate are studied. Statistical processing of the dunes relief parameters with steady and unsteady water movement is carried out. Hydraulic studies and numerical experiments have made it possible to identify the specifics of sediment movement in conditions of unsteady movement. It has been experimentally established that with unsteady movement of water, sediment transport is activated at the moments of the water release wave passage. At the same time, the main parameters of the sediment transport, namely, the dunes movement speed and sediment consumption, increase in comparison with the steady movement of water.

Keywords: water flow rate, water discharge, bedload sediment transport, sediment discharge, parameters of dunes, Froude number, Chézy's coefficient, unsteady flow.

For citation:

Gladkov, Gennadii L., Polina S. Rzhakovskaya, and Ruslan V. Zavarzin. "Experimental studies of flow hydraulics and bedload transport parameters in unsteady flow." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196.

УДК 556.536

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИКИ ПОТОКА И ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТА ДОННЫХ НАНОСОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ

Г. А. Гладков¹, П. С. Ржаковская¹, Р. В. Заварзин^{1,2}

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

² — ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик течения воды и параметров транспорта наносов, выполненных в гидравлическом лотке с песчаным деформируемым дном при установившемся и неустойчивом режиме течения воды. Эксперименты проведены

в гидравлическом лотке длиной 8,0 м и шириной 0,21 м, оборудованном устройствами для изменения уклона дна в диапазоне значений: прямым — до 0,025, обратным — до 0,015, а также для автоматического воспроизведения гидрографа стока по заданной программе. Диапазон расходов в экспериментах изменялся в диапазоне от 2,0 л/с до 6,0 л/с. В качестве руслового материала использовался кварцевый песок диаметром 0,1–0,3 мм. В работе определены значения и дана оценка интенсивности изменения основных характеристик речного потока при распространении волны попуска, включая характер изменения уровневого режима и уклонов свободной поверхности, а также режим скоростей течения воды. Изучены параметры транспорта влекомых наносов, в том числе длины и высоты донных гряд, скорости перемещения гряд и расход наносов. Выполнена статистическая обработка параметров грядового рельефа при установившемся и неустойчивом движении воды. Гидравлические исследования и численные эксперименты позволили выявить специфику движения наносов в условиях неустойчивого движения. Экспериментально подтверждено, что при неустойчивом движении воды транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны попуска воды. При этом основные параметры транспорта наносов — скорость перемещения гряд и расход наносов — возрастают по сравнению со стационарным движением воды.

Ключевые слова: скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, число Фруда, коэффициент Шези, неустойчивое течение воды.

Для цитирования:

Гладков Г. Л. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустойчивом движении воды / Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская, Р. В. Заварзин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196.

Введение (Introduction)

Инженерное обоснование вопросов проектирования и строительства инфраструктурных объектов на судоходных реках заключается в необходимости оценки влияния проектируемого сооружения на гидравлику речного потока в процессе строительства и на момент его завершения, а также в составлении прогноза изменения характеристик речного потока и русловых переформирований на долгосрочный период его эксплуатации. При кардинальном улучшении судоходных условий и содержании судовых ходов на реках первая задача решается достаточно надежно в результате проведения исследований на пространственных гидравлических моделях [1], а также при выполнении гидравлических расчетов по апробированным на практике методикам.

При составлении прогнозов русловых деформаций в реках на перспективу выполняется анализ руслового процесса в соответствии с рекомендациями, учитывающими гидроморфологический режим судоходных рек [2], [3], геоморфологические типы формирования русел и их морфодинамику [4]–[6]. При численном моделировании русловых переформирований и составлении русловых прогнозов в реках используются теоретические основы динамики русловых потоков [7], [8], результаты гидравлических и гидроморфологических исследований, а также современный аппарат математического моделирования [9]–[11]. На зарегулированных участках рек основные затруднения для судоходства проявляются, как правило, вследствие развития эрозионных процессов в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора со стороны нижнего бьефа. В границах Единой глубоководной системы европейской части РФ в настоящее время не обеспечиваются проходные судоходные глубины на реке Волге в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла [12], на участке реки Камы ниже Чайковского шлюза, на реке Дон в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла, а также на реке Волге ниже Волгоградского гидроузла. На сибирских реках аналогичные проблемы проявились в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла, на реке Обь и на других объектах. Подобные затруднения для судоходства встречаются повсеместно, в том числе на водных путях Западной Европы [13], [14].

Исследования гидравлических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов стали проводиться в первой половине XX века одновременно с началом активного гидротехнического строительства. В монографиях [15]–[17], посвященных изучению неустойчивого движения воды в реках, приведены сведения о том, что при прохождении волны попуска в нижнем бьефе гидроузла нарушается однозначная связь между расходами и уровнями воды. По мере своего

удаления от створа гидроузла вниз по течению реки волна попуска расплывается, в результате чего амплитуды изменения величины попускового расхода воды и высоты волны попуска по длине реки уменьшаются. При прохождении волны попуска эпюра распределения скорости течения воды по вертикали трансформируется, причем наиболее значительные изменения в кинематике потока наблюдаются в непосредственной близости от створа гидроузла.

Проведенные исследования [18]–[22] позволили в целом описать особенности гидравлики потока при изменяющемся во времени расходе воды. Было установлено, что при неустановившемся движении воды две переменные потока (уровень и расход воды) различны для восходящей и нисходящей части попусковой волны. Также было установлено, что пики переменных характеристик потока не совпадают и распределены по времени в следующем порядке: уклон свободной поверхности воды, средняя скорость в поперечном сечении, расход воды и уровень воды. Каких-либо определенных данных о динамике грядового рельефа в условиях неустановившегося движения воды в этих работах не приводится.

При подготовке настоящей работы были выполнены численные эксперименты по оценке гидравлических характеристик речного потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах ряда гидроузлов на крупных судоходных реках [23]–[25] на основе данных почасовых наблюдений за сбросными расходами и уровнями воды. Полученные результаты позволили изучить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды и получить определенные рекомендации для установления граничных условий при моделировании русловых переформирований. Численные эксперименты показали, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны сбросного попуска воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов: скорость перемещения гряд и расход наносов, возрастают по сравнению со стационарным течением воды. Определяющим фактором русловых переформирований в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками воды.

В естественных русловых потоках с подвижным дном характеристики грядового рельефа дна: размеры гряд и скорость их перемещения, определяются скоростью течения воды и глубиной потока — от крупности донных частиц размеры гряд зависят слабо. Результаты численных экспериментов, выполненных для трех гидроузлов [23]–[25], показали, что при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе расход наносов возрастает в 2–6 раз по сравнению с аналогичными данными при установившемся движении воды при равных значениях среднесуточных расходов воды за расчетный период времени.

Полученные результаты необходимо проверить в ходе экспериментальных исследований. Для изучения гидравлических характеристик потока и параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды в рамках настоящей работы выполнен анализ имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, а также проведен новый цикл экспериментов в гидравлическом лотке с песчаным руслом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Экспериментальные исследования движения наносов. Обширное исследование параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды было проведено группой авторов в работе [21]. Эксперименты проводились в 22-метровом гидравлическом лотке шириной 0,75 м. Переменный расход контролировался программируемым насосом с частотным инвертором, способным производить плавный непрерывный гидрограф любой формы. Продолжительность одного цикла эксперимента, включая фазу подъема и спада уровней воды составляла 4–6 ч. Величина подаваемого расхода изменялась до 100 л/с. Данное исследование проводилось для изучения процесса развития интенсивности эрозии дна в верховой части гидравлического лотка при изменяющимся во времени расходе воды. Нестационарность потока оценивалась с использованием коэффициентов, рекомендованных в работе [18]. Полученные результаты демонстрируют, что величина

расхода наносов в лотке в значительной степени связана с интенсивностью изменения сбросного расхода воды. В данной работе был зафиксирован эффект образования гистерезиса наносов при меняющемся во времени расходе воды. В разных экспериментах максимум расхода наносов наблюдался как на пике попуска воды, так и с опережением или запаздыванием относительно момента его наступления.

В работе [26] приведены результаты экспериментальных исследований параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды. Исследования проводились в гидравлическом лотке шириной 0,8 м. В ходе экспериментов использовались различные гидрографы формирования волны попуска треугольного вида и трапецеидального вида. В качестве материала в лотке применялся гравий средний крупности диаметром 4,8 мм, формирования гряд в экспериментах не происходило. Полученные данные показали, что величина расхода наносов возрастает с ростом попускового расхода, однако максимум его наступает несколько позже, чем максимум расхода воды. При этом общий расход наносов возрастает экспоненциально с увеличением расхода воды. В работе [27] выполнено аналогичное исследование для бимодального грунта — смеси частиц песка и гравия в лабораторном лотке. В экспериментах использовались пять различных по продолжительности сбросных треугольных гидрографов стока продолжительностью 250–600 с. Согласно полученным в этой работе данным на разных фазах гидрографа изменялось соотношение между объемами песка и гравия в транспортируемом материале. Процент мелкозернистости на плато кривой распределения бимодальных отложений по размерам имел более высокие значения на начальной и конечной фазах гидрографа.

Коэффициент нестационарности неустановившегося движения воды учитывался в соответствии с рекомендациями [18], [28]. В реальных условиях при суточном регулировании стока обычно имеют место трапецеидальный вид сбросного расхода, в котором фаза подъема занимает относительно непродолжительное время [23]–[25]. Причем анализируя диапазон изменения скорости течения воды, следует полагать, что транспорт наносов в данном случае будет осуществляться эпизодически, исключительно в моменты прохождения волны сбросного попуска воды.

Вопрос практической значимости заключается в численной оценке величины расхода наносов при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла. В работах [23]–[25] численные эксперименты выполнялись с использованием двух апробированных расчетных формул. Данные эксперименты показали значительное увеличение величины расхода наносов при прохождении волны попуска в нижнем бьефе по сравнению со стационарным движением воды.

Расчетная формула (1), полученная в работе [2], впоследствии уточнялась в работах [29], [30] по данным измерений параметров грядового рельефа, выполненных на равнинных реках, на гидравлических моделях и в гидравлических лотках. Основными определяющими факторами величины расхода наносов в этой формуле являются глубина потока H , скорость течения воды V и число Фруда $(V / \sqrt{gH})$. Данная расчетная формула записывается в виде

$$q_s / HV = 0,0014(V / \sqrt{gH})^{3,11}. \quad (1)$$

Приведем формулу, полученную К. В. Гришаниным [31] по данным о деформациях русла и элементах движения гряд на нескольких участках больших равнинных рек России:

$$q_s = 0,015(V / V_{нр})^3 d(V - V_{нр}). \quad (2)$$

Основная разница в структуре этих формул заключается в том, что в формуле К. В. Гришанина содержится множитель, в котором вычисляется разность между средней V и неразмывающей $V_{нр}$ скоростью течения воды. На данном этапе работы необходимо проверить точность результатов численных экспериментов по материалам дополнительных исследований в гидравлическом лотке.

Экспериментальные исследования в гидравлическом лотке. Для изучения гидравлических характеристик потока и параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды в рамках настоящей работы был выполнен цикл экспериментов в гидравлическом лотке с песча-

ным дном. Исследования проводились в малом гидравлическом лотке на Главной экспериментальной базе Государственного гидрологического института с мелким песком крупностью 0,1–0,3 мм. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 1. Основные технические характеристики гидравлического лотка приведены в работе [1].

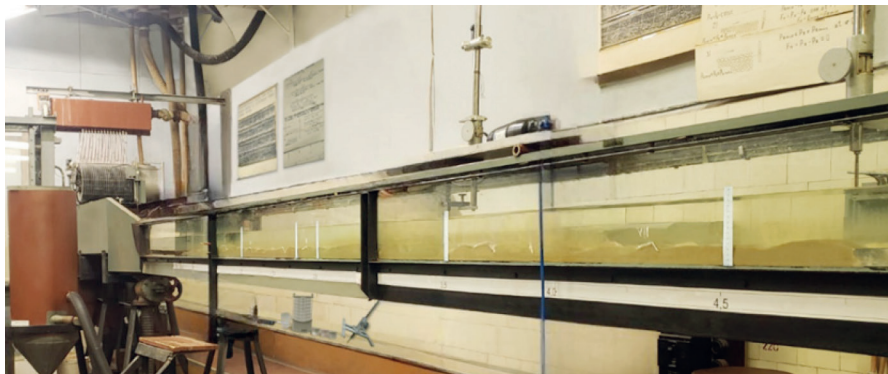


Рис. 1. Общий вид гидравлического лотка
Fig. 1. General view of the hydraulic flume

Для выбора режимов моделирования на подготовительном этапе работы всего было проведено семь циклов экспериментов при установившемся расходе воды в диапазоне значений от 2,9–6,0 л/с. В каждом цикле исследований на дне лотка формировался устойчивый грядовый рельеф дна с глубиной потока в диапазоне значений 5,2–8,8 см, величина которой устанавливалась в лотке в зависимости от подаваемого расхода воды. В ходе проведения каждого циклов экспериментов измерялись размеры гряд на дне лотка и скорости их перемещения, уклоны свободной поверхности, а также скорости течения воды в лотке в различных точках по глубине потока. На основе параметров донных гряд вычислялся расход наносов в лотке.

Для контроля величины твердого стока дополнительно измерялась величина выноса перемещаемых наносов с помощью специальной ловушки, расположенной в концевой части лотка. Гидравлические характеристики потока и параметры гряд при неустановившемся движении воды были измерены в трех циклах экспериментов при трапецидальном гидрографе пуща воды. Основные результаты выполненных исследований приведены в таблице (с. 186).

Методика обработки результатов измерений параметров донных гряд. При определении расхода наносов по параметрам донных гряд предполагается [7], что малые русловые формы (гряды) находятся в равновесии с установившимся русловым потоком, а форма гряд остается неизменной при перемещении их вниз по течению. В этом случае на основе классического уравнения деформации выводится уравнение, определяющее элементарный расход донных наносов в виде

$$q_s = (1 - \varepsilon) C_r \frac{\omega_r}{l_r} = (1 - \varepsilon) \sigma C_r h_r, \quad (3)$$

где ε — коэффициент пористости донных отложений;

C_r — скорость перемещения гряды;

ω_r — площадь продольного сечения гряды;

l_r — длина гряды;

$\sigma = \omega_r / (l_r h_r)$ — коэффициент полноты профиля гряды;

h_r — высота гряды.

По данным измерений гряд в реальных условиях как на реках, так и в гидравлических лотках параметры гряд (высота и длина) существенно варьируют по своей величине. В этой связи для повышения качества и надежности результатов обработки данных измерений размеров гряд эхолотом в работе применялась специальная методика [32].

Результаты экспериментов в гидравлическом лотке

№ п/п.	Параметр	Номер эксперимента									
		при установленном режиме течения воды					при неустановившемся режиме течения воды				
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 8	№ 9	№ 6	№ 7	№ 10
1	Расход воды в лотке, л/с	2,9	3,5	4,4	6,0	5,7	3,3	3,3	1,8–5,3	1,6–5,1	1,8–5,0
2	Глубина над гребнем гряды ¹ , см	4,5	5,5	5,7	6,6	8,0	6,0	6,0	5,5–7,5	4,7–7,3	5,3–7,2
3	Средняя глубина в лотке ² , см	5,2	6,3	6,4	7,3	8,8	6,6	6,6	6,1–8,1	5,4–8,0	6,0–7,9
4	Скорость над гребнем гряды ¹ , см/с	28,2	22,9	33,2	36,7	29,0	27,4	26,4	13,3–29,3	13,7–32,9	19,3–30,2
5	Средняя скорость в лотке ² , см/с	26,6	26,5	32,7	39,1	30,8	23,8	23,8	14,1–31,2	14,1–30,4	14,3–30,0
6	Средняя длина гряд L_{Γ} см	14,72	15,57	12,09	13,28	16,62	12,21	13,86	11,71	13,18	11,84
7	Средняя высота гряд h_{Γ} см	1,38	1,62	1,34	1,48	1,60	1,12	1,26	1,20	1,30	1,25
8	Средняя скорость гряд C_{Γ} см/мин	0,15	0,11	0,18	0,33	0,08	0,03	0,05	0,13	0,058	0,113
9	Расход донных наносов Q_s , см ³ /мин	3,00	2,52	3,42	6,51	1,81	0,47	0,84	2,16	1,07	2,00
10	Вынос (ловушка), см ³ /мин	3,05	2,16	3,64	6,92	2,06	0,63	0,75	0,83	1,18	1,30
11	Число Фруда ¹ (безразмерная величина)	0,42	0,31	0,44	0,46	0,33	0,36	0,34	0,18–0,34	0,20–0,39	0,19–0,44
12	Число Фруда ² (безразмерная величина)	0,37	0,34	0,41	0,46	0,33	0,30	0,30	0,18–0,35	0,19–0,34	0,19–0,34
13	Уклон свободной поверхности, ‰	1,33	1,0	1,33	2,0	1,33	1,50	1,50	1,0–2,0	1,0–2,0	1,0–2,0
14	Продолжительность эксперимента ³ , мин	312	217	170	143	83	135	520	180	140	158
15	Расход наносов по формуле (1), см ³ /мин	11,31	10,01	23,54	45,62	15,42	6,27	6,27	8,44	7,81	10,64
16	Расход наносов по формуле (2), см ³ /мин	4,36	3,22	13,76	33,38	6,58	0,87	0,87	3,66	3,29	4,85

Примечания:

¹ Параметры течения, измеренные / рассчитанные на вертикали над гребнем гряды в потоке.

² Средние параметры течения, измеренные/ рассчитанные для живого сечения лотка.

³ Без учета времени формирования рельефа.

В соответствии с этими рекомендациями при статистической обработке грядового рельефа дна из профиля исключаются незначимые выступы. Мерой оценки значимости принята величина, кратная среднему квадратичному отклонению отметок промерных точек на профиле. Эта характеристика не включает общий тренд и очертания крупных форм на дне потока, а показывает лишь случайный разброс смежных точек на промерном профиле. Величина отклонения определяется методом последовательных разностей, а все пики на профиле размером менее выбранного значения фильтра выбраковываются.

При обработке рельефа дна фильтр принимался равным 0,2 см. Средняя длина и высота гряд находятся как среднеарифметические значения из всех полученных геометрических характеристик гряд. Коэффициент полноты профиля гряды находился для каждого продольного профиля отдельно делением площади всех зафиксированных на профиле гряд, на площадь активного слоя, в границах которого происходит движение русловой формы в момент измерений. Ввиду того, что полученный грядовой рельеф состоит преимущественно из трехмерных гряд, при вычислении расхода наносов по формуле (3), в соответствии с рекомендациями В. И. Замышляева и Б. Ф. Снищенко, приведенными в работе [33], использовался поправочный коэффициент, равный 1,35.

Оценку среднего смещения донных форм на продольном створе между разновременными промерами предлагается выполнять по характеристикам пространственно-временной корреляции массивов полученных промерных данных. Значения корреляционной функции вычисляются по данным двух последовательных промеров глубин эхолотом. На полученном таким образом графике значение первого максимума корреляционной функции равно среднему смещению донных форм по профилю за период времени между измерениями, что позволяет определить среднюю скорость перемещения донных гряд для вычисления расхода наносов. В ходе проведения экспериментов в гидравлическом лотке был получен большой объем новых экспериментальных данных, иллюстрирующих кинематику потока и параметры транспорта наносов при установившемся и неуставившемся движении воды.

Результаты (Results)

Скоростной режим потока при неуставившемся движении воды. На рис. 2, а для иллюстрации урванного и скоростного режимов потока при неуставившемся движении воды в гидравлическом лотке приведены хронологические графики изменения расходов и уровней воды и график изменения средней по живому сечению скорости течения воды. Там же дополнительно показан график изменения величины неразмывающей скорости течения (по В. Н. Гончарову, 1938). Полученные результаты показывают, что скорости течения, превышающие критические значения (см. рис. 2, б), наблюдаются исключительно в моменты прохождения попусков воды.

В процессе выполнения работы был изучен характер связи между расходами и уровнями воды в гидравлическом лотке. Полученные данные (рис. 3, а) показывают, что при неуставившемся режиме сбросных расходов воды в лотке однозначность связи между расходами и уровнями воды нарушается. Аналогичным образом нарушается однозначность связи между скоростью течения воды и уровнями воды в лотке, а также однозначность связи числа Фруда с уровнями воды. Минимальное значение скорости течения воды в живом сечении (около 12–13 см/с) соответствует моменту окончания сбросного попуска воды. Далее, несмотря на продолжающееся понижение уровней воды в лотке, скорость течения начинает возрастать с небольшой интенсивностью при минимальном сбросном расходе воды до момента достижения самого низкого уровня воды. С этого момента начинается новый сбросной попуск воды и скорость течения воды интенсивно возрастает до своего максимального значения (около 32–34 см/с) при уровне воды 11,2–11,6 см. Своего максимума сбросной расход воды достигает немного позже, при уровне воды 12,7 см.

Общий ход графика изменения числа Фруда с изменением уровня воды (рис. 3, б) соответствует аналогичному графику изменения скорости течения воды. Таким образом, учет глубины потока в составе числа Фруда в связи с небольшим изменением уровня воды, а, соответственно, и глубины потока, при прохождении сбросного расхода попуска оказывается несущественным и не сказывается на очертании графика.

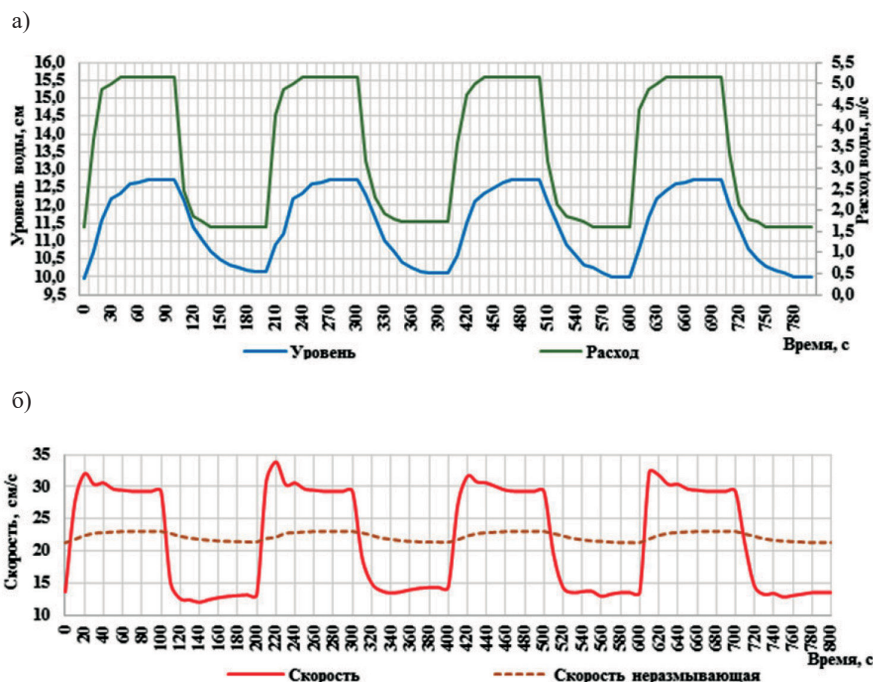


Рис. 2. Хронологические графики изменения расходов и уровней воды (а) и средней по живому сечению скорости течения воды (б)

Fig. 2. Chronological graphs of changes in flow rates and water levels (а) and average over the live section water flow velocity (б)

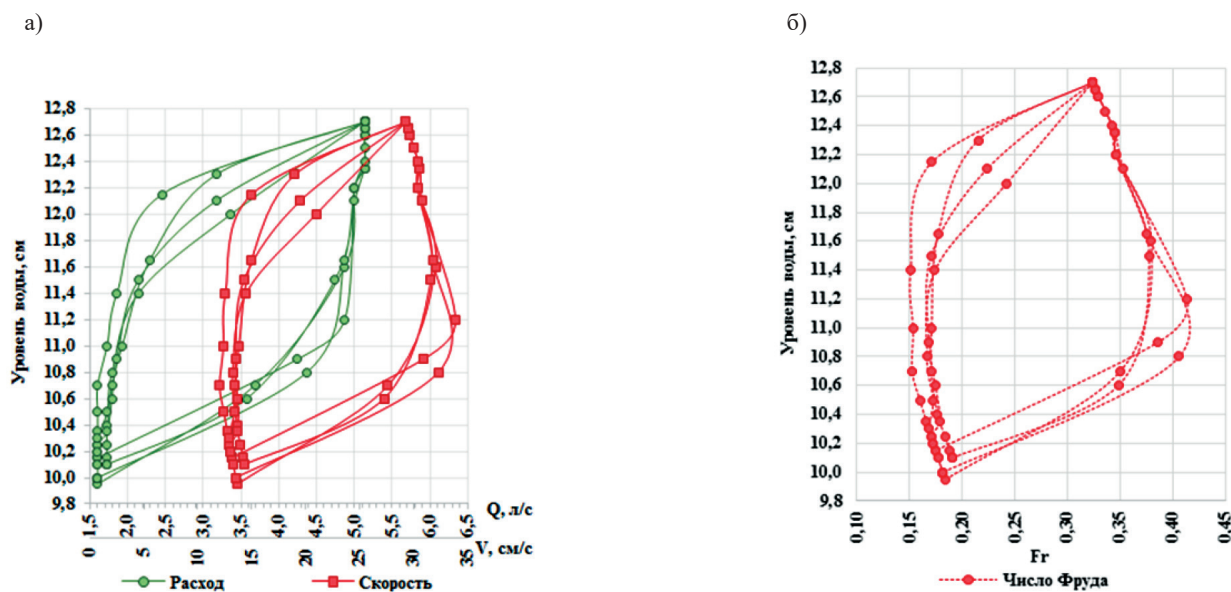


Рис. 3. Графики зависимости расхода воды, скорости течения (а) и числа Фруда от уровня воды (б)

Fig. 3. Graphs of the dependence of water flow, flow speed (а) and the Froude number per water level (б)

Для анализа условий транспорта наносов на рис. 4 приведен совмещенный хронологический график изменения поверхностной и средней по живому сечению скорости течения воды при прохождении волны пускa в гидравлическом лотке. Дополнительно на этом графике показаны результаты измерения продольной и вертикальной составляющих скорости течения в точке 3 см от гребня гряды на дне, а также результаты расчета неразрывающейся скорости течения.

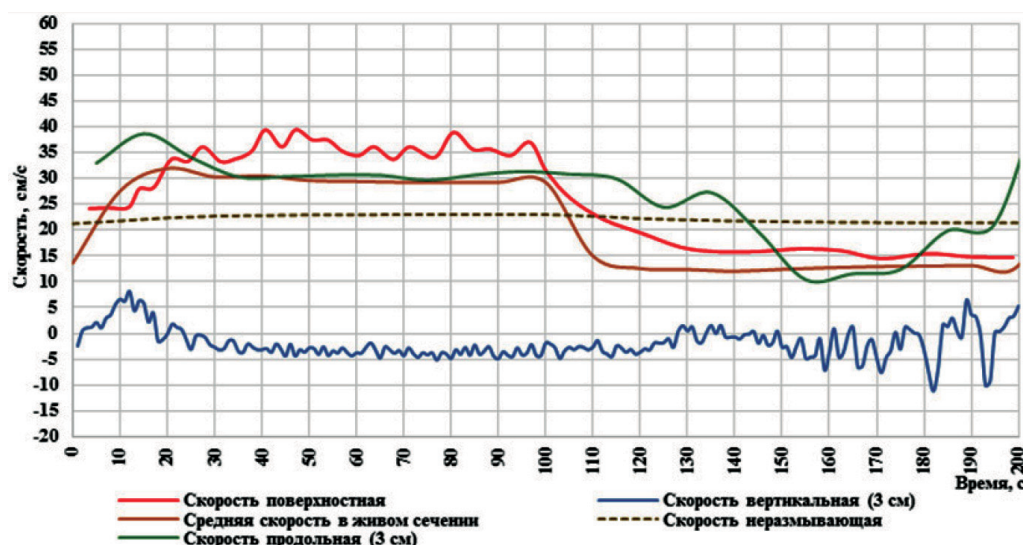


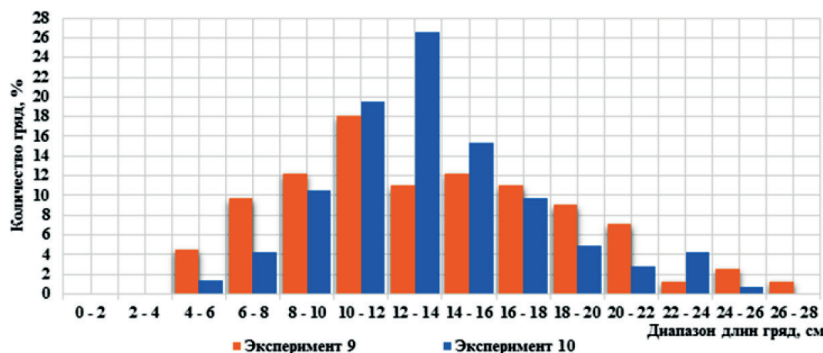
Рис. 4. Хронологические графики изменения скоростей течения воды при прохождении волны попуска в лотке
Fig. 4. Chronological graphs of changes in water flow velocities during the release wave in the flume

Параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды. Результаты выполненных измерений показали, что при прохождении волны попуска в лотке формируется сложная кинематическая структура потока. При этом максимум вертикальной составляющей скорости течения воды наступает примерно на 10-й – 12-й секунде с момента начала попуска воды. Затем примерно на 15-й секунде наблюдается максимум продольной скорости течения воды на вертикали. Максимум средней по живому сечению скорости наступает примерно на 20-й секунде с момента начала попуска. Самым последним по времени, примерно на 30-й – 40-й секунде с начала попуска воды, в потоке отмечается максимум поверхностной скорости течения воды. Отсюда следует, что в начальный период прохождения волны попуска воды в лотке следует ожидать интенсивного перемещения наносов на дне потока. В моменты времени, отвечающие началу сдвига частиц на дне потока, связь между расходом наносов и средней скоростью течения воды (касательным напряжением на дне потока) оказывается существенно более сильной, чем при установившемся массовом движении донных наносов в потоке.

По разным оценкам [7], показатель степени при скорости течения воды в формуле расхода наносов в начале движения частиц грунта на дне потока оказывается в 5–6 раз больше, чем это принято в традиционных расчетных зависимостях, полученных при установившемся массовом движении наносов. До конца попуска воды скорости течения воды в лотке остаются в среднем на 30 % больше соответствующих значений скоростей течения воды при установившемся движении. Полагая зависимость расхода наносов, пропорциональной скорости течения воды в 3-й – 4-й степени, следует ожидать, что в этот период его величина будет в 2,5–2,7 раза больше, чем при установившемся движении воды. И, наконец, в момент окончания попуска воды скоростной режим в лотке изменяется. Наиболее быстро, в течение первых десяти секунд, уменьшается средняя по живому сечению скорость течения воды. Поверхностная скорость снижается примерно в течение 30 с после уменьшения сбросного расхода воды. Продолжительнее всего по времени (примерно до 50 с) происходит гашение средней на вертикали скорости течения. В течение этого периода следует ожидать продолжение активного перемещения наносов на дне потока. Таким образом, все три аргумента могут явиться причиной увеличения расхода наносов при неустановившемся движении воды по сравнению с установившимся режимом течения. Эти данные подтверждаются ранее выполненными численными экспериментами, а также результатами настоящих исследований в гидравлическом лотке.

Статистический анализ параметров донных гряд позволил оценить характер распределения длин и высот гряд при установившемся и неустановившемся режимах течения воды в гидравлическом лотке. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты обработки данных, полученных в экспериментах № 9 и № 10. Общее количество гряд, зафиксированных в эксперименте № 9, составило 154, в эксперименте № 10 — 141.

а)



б)

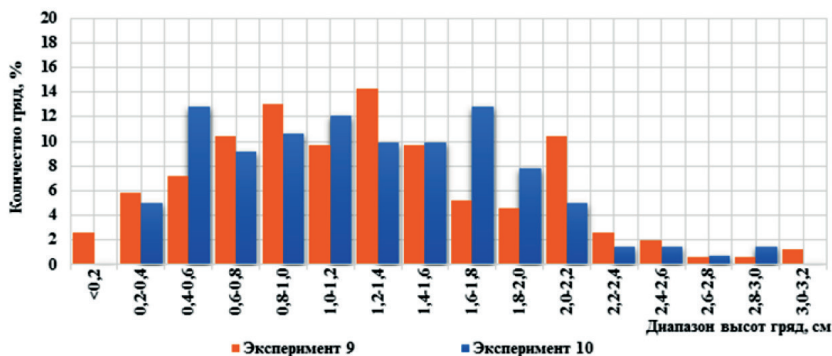


Рис. 5. Совмещенные графики распределения донных гряд по диапазонам длин (а) и высот (б) при установившемся и неустановившемся движении воды: эксперимент № 9 — установившееся движение $Q = 3,3$ л/с, $H = 6,0$ см; эксперимент № 10 — неустановившееся движение $Q = 1,6-4,9$ л/с, $H = 4,7-7,3$ см

Fig. 5. Combined graphs of the dunes distribution over the ranges of lengths (a) and heights (b) under steady and unsteady water movement: Experiment No. 9 — steady flow $Q = 3,3$ l/s, $H = 6,0$ cm; Experiment No. 10 — unsteady flow $Q = 1,6-4,9$ l/s, $H = 4,7-7,3$ cm

Полученные результаты показали, что при установившемся движении воды (рис. 5, а) примерно 80 % значений длин гряд расположены в диапазоне 8–20 см, тогда как при неустановившемся движении тот же процент гряд сконцентрирован в диапазоне значений 8–16 см. В эксперименте № 10 наблюдается отчетливо выраженный экстремум в диапазоне значений длин гряд 12–14 см. При установившемся движении воды максимум длин гряд отмечается в таком же диапазоне значений, однако он выражен не так сильно. Средние длины гряд в обоих экспериментах оказались близкими по величине. Анализируя графики распределения количества гряд по высотам (см. рис. 5, б), можно заметить, что в обоих экспериментах примерно 90 % гряд сконцентрированы в примерно одинаковых диапазонах значений: 0,4–2,4 см в эксперименте № 9 и 0,4–2,2 см в эксперименте № 10. При установившемся движении визуально выделяется локальный максимум в диапазоне высот 2,0–2,2 см.

Опыт обработки грядового рельефа дна в проведенных экспериментах показывает, что при наличии большего количества исходных данных такие локальные максимумы сглаживаются. Таким образом, при исключении этого максимума высоты гряд распределяются в диапазоне 0,4–1,6 см.

Кроме того, можно отметить более плавное распределение высот в эксперименте № 10, что свидетельствует об относительно более широком диапазоне возможных высот гряд при неустановившемся режиме.

Средние значения высоты гряд в обоих экспериментах оказались практически одинаковыми. При этом коэффициент полноты профиля гряды, вычисляемый для каждого продольного профиля во всех экспериментах, находился в узком диапазоне значений 0,50–0,53 вне зависимости от режима подачи сбросного расхода воды.

На рис. 6 показаны совмещенные графики корреляционных функций скорости перемещения донных гряд на центральном продольнике, полученные в результате статистической обработки параметров грядового рельефа при установившемся и неустановившемся движении воды в гидравлическом лотке.

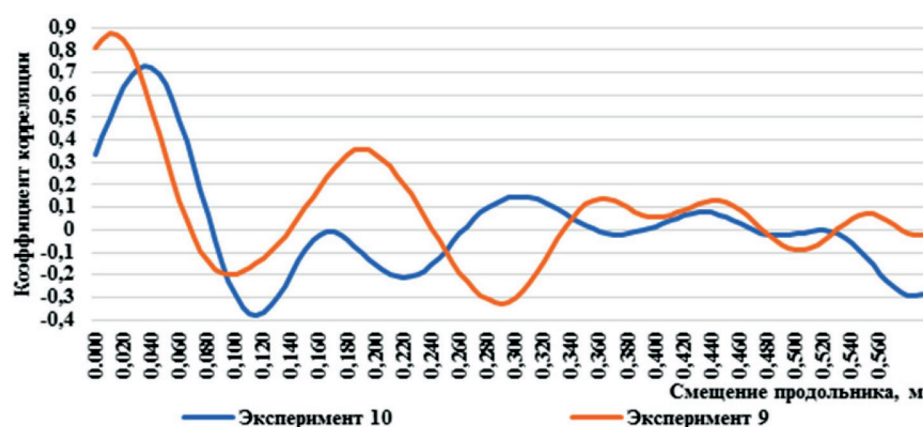


Рис. 6. Совмещенные графики корреляционной функции по данным измерения смещения донных гряд при установившемся и неустановившемся движении воды

Fig. 6. Combined graphs of the correlation function based on the measurement data of the antidunes displacement during steady and unsteady water flow

Как видно на графике, максимальное значение коэффициента корреляции в эксперименте № 9 наблюдается в точке 0,015 м, тогда как в эксперименте № 10 — в точке 0,035 м. Временной интервал между измерениями в обоих случаях составлял 30 мин. Таким образом, скорость гряд в эксперименте № 9 составляет 0,05 см/мин, в эксперименте № 10 — 0,11 см/мин. Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод о том, что основной причиной увеличения расхода донных наносов при неустановившемся режиме течения является возрастание скорости перемещения гряд в моменты прохождения сбросных попусков воды.

Заключение (Conclusion)

При подготовке настоящей работы авторами были выполнены численные эксперименты по оценке гидравлических характеристик речного потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах гидроузлов на крупных судоходных реках. Полученные результаты позволили изучить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды. Определяющим фактором в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками. Для апробации результатов численного моделирования в настоящей работе были проведены эксперименты в гидравлическом лотке с подвижным дном при установившемся и неустановившемся режимах движения воды. Выполненные эксперименты позволили установить, что длины и высоты донных гряд слабо зависят от режима подачи сбросного расхода воды в лотке. При этом характер распределения параметров гряд по величине различается.

Результаты статистической обработки материалов измерений параметров грядового рельефа показали, что при неустановившемся движении воды скорость перемещения донных гряд возрастает по сравнению со стационарным течением воды. При этом осредненная за период прохождения попусковой волны величина расхода наносов при неустановившемся движении воды в гидравлическом лотке увеличилась в два раза по сравнению с установившимся движением воды в лотке. Эти данные качественно согласуются с материалами численных экспериментов. Таким образом, экспериментально установлено, что основной причиной интенсификации транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов следует считать увеличение скорости перемещения донных гряд.

Сопоставление рассчитанных и измеренных значений расхода наносов показало, что точность вычисления параметров твердого стока по используемым в работе расчетным формулам оказалась низкой. Формула (1) показала в разных экспериментах завышение рассчитанного расхода наносов на величину до одного порядка по сравнению с измеренными значениями расходов. Расхождение между рассчитанными и измеренными значениями расхода наносов по формуле (2) оказалось меньше.

Прогноз русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов при неустановившемся движении воды представляется сложной задачей и требует проведения дополнительных натурных и экспериментальных исследований. Новые результаты, полученные в данной области исследования, позволят улучшить практику гидравлических расчетов гидродинамических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов при выполнении расчетного обоснования путевых мероприятий на судоходных реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 544 с.
2. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Сنيщенко. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
3. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 4-е изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2023. — 432 с.
4. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. — 608 с.
5. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — М.: КРАСАНД, 2011. — Т. 2: Морфодинамика речных русел. — 960 с.
6. Чалов Р. С. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений / Р. С. Чалов, С. Р. Чалов // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47. — № 3. — С. 259–271. DOI: 10.31857/S0321059620030049.
7. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
8. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
9. Belikov V. V. On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers / V. V. Belikov, N. M. Borisova, T. A. Fedorova, O. A. Petrovskaya, V. M. Katolikov // Water Resources. — 2019. — Vol. 46. — Is. 1. — Pp. S20–S28. DOI: 10.1134/S0097807819070029.
10. Беликов В. В. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики / В. В. Беликов, А. И. Алексюк. — М.: РАН, 2020. — 346 с.
11. Prokofyev V. A. Application of unified 3D hydro-thermal model of a reservoir for estimation of HPP construction influence on environment / V. A. Prokofyev // ICOLD, Proceedings of the International Symposium on Dams on changing word. — Kyoto, 2012. — Pp. 69–74.
12. Garibin P. Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky hydraulic unit on the Volga River / P. Garibin, G. Gladkov, K. Morgunov, M. Kolosov // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. DOI: 10.1063/5.0103780.

13. *Babiński Z.* Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower / Z. Babiński, M. Habel // *Acta Energetica*. — 2013. — Vol. 4. — Pp. 83–96. DOI: 10.12736/issn.2300–3022.2013206.
14. *Schoeneich M.* An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways / M. Schoeneich, M. Habel, D. Szatten, D. Absalon, J. Montewka // *Water*. — 2023. — Vol. 15. — Is. 1. — P. 141. DOI: 10.3390/w15010141.
15. Исследования неустановившегося движения воды на реке Свири в зимних и летних условиях / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. ордена Трудового Красного Знамени гидрол. ин-т; Под ред. канд. техн. наук Н. Е. Кондратьева и канд. техн. наук В. А. Урываева. — Л.: Гидрометеиздат, 1963. — 252 с.
16. *Розовский И. Л.* Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло / И. Л. Розовский, Е. В. Еременко, В. А. Базилевич. — Киев: Наукова думка, 1967. — 276 с.
17. *Грушевский М. С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах / М. С. Грушевский. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 288 с.
18. *Graf W.* Unsteady flow and its effect on sediment transport / W. Graf, L. Suszka // *Proceedings, 21st IAHR Congress*. — Melbourne, Australia, 1985. — Pp. 540–544.
19. *Graf W. H.* Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry / W. H. Graf. — Wiley, 1998. — 692 p.
20. *Mrokowska M. M.* Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments / M. M. Mrokowska, P. M. Rowiński // *Water*. — 2019. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 907. DOI: 10.3390/w11050907.
21. *Wang L.* Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs / L. Wang, A. Cuthbertson, G. Pender, D. Zhong // *Water Resources Research*. — 2019. — Vol. 55. — Is. 7. — Pp. 5431–5452. DOI: 10.1029/2018WR024413.
22. *Muste M.* Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows / M. Muste, K. Lee, D. Kim, C. Bacotiu, M. R. Oliveros, Z. Cheng, F. Quintero // *Journal of hydraulic research*. — 2020. — Vol. 58. — Is. 6. — Pp. 867–887. DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742.
23. *Гладков Г. Л.* Гидравлика потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках / Г. Л. Гладков, В. М. Католиков, П. С. Ржаковская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 24–43.
24. *Гладков Г. Л.* Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла / Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.
25. *Gladkov G.* Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River / G. Gladkov, V. Katolikov, P. Belyakov, P. Rzhakovskaya, V. Zamyshlyayev // *International Journal of Sediment Research*. — 2024. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2024.01.004. [In Press, Corrected Proof].
26. *Bombar G.* Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows / G. Bombar, Ş. Elçi, G. Tayfur, M. Ş. Güney, A. Bor // *Journal of Hydraulic Engineering*. — 2011. — Vol. 137. — No. 10. — Pp. 1276–1282. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000041.
27. *Bombar G.* Effects of Flow Unsteadiness on the Transport of Bimodal Bed Material / G. Bombar, A. O. Aksoy, M. Ş. Güney // *Turkish Journal of Civil Engineering*. — 2023. — Vol. 34. — Is. 6. — Pp. 99–128. DOI: 10.18400/tjce.1226516.
28. *Lee K. T.* Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions / K. T. Lee, Y. L. Liu, K. H. Cheng // *Hydrological processes*. — 2004. — Vol. 18. — Is. 13. — Pp. 2439–2454. DOI: 10.1002/hyp.1473.
29. *Petrovskaya O. A.* On the relationship of bed load transport with the Froude number / O. A. Petrovskaya, G. L. Gladkov // *Water Resources*. — 2022. — Vol. 49. — Is. 1. — Pp. 88–97. DOI: 10.1134/S0097807822010134.
30. *Гладков Г. Л.* Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
31. *Гришанин К. В.* Теория руслового процесса / К. В. Гришанин. — М.: Транспорт, 1972. — 216 с.

32. Костюченко А. А. Метод выполнения и обработки измерений для определения параметров донных гряд / А. А. Костюченко, Р. В. Заварзин // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 151–164.

33. Заварзин Р. В. Измерения расхода донных наносов, перемещающихся в грядовой форме: экспериментальное исследование косвенных методов измерений / Р. В. Заварзин, О. А. Петровская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 213–231.

REFERENCES

1. Klaven, A. B., and Z. D. Kopalani. *Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое моделирование rechnykh potokov i ruslovogo protsessa*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.

2. Kondrat'ev, N. E., I. V. Popov, and B. F. Snishchenko. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.

3. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2022.

4. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 1. Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. M.: Izd-vo LKI, 2008.

5. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND, 2011.

6. Chalov, R. S., and S. R. Chalov. "Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding." *Water Resources* 47.3 (2020): 374–386.

7. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.

8. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.

9. Belikov, V. V., N. M. Borisova, T. A. Fedorova, O. A. Petrovskaya, and V. M. Katolikov. "On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers." *Water Resources* 46.1 (2019): S20–S28. DOI: 10.1134/S0097807819070029.

10. Belikov, V. V., and A. I. Aleksyuk. *Modeli melkoi vody v zadachakh rechnoi gidrodinamiki*. M.: RAN, 2020.

11. Prokofyev, V. A. "Application of unified 3D hydro-thermal model of a reservoir for estimation of HPP construction influence on environment." *ICOLD, Proceedings of the International Symposium on Dams on changing word*. Kyoto, 2012. 69–74.

12. Garibin, Pavel, Gennady Gladkov, Konstantin Morgunov, and Michael Kolosov. "Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky hydraulic unit on the Volga River." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0103780.

13. Babiński, Zygmunt, and Michal Habel. "Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower." *Acta Energetica* 4 (2013): 83–96. DOI: 10.12736/issn.2300–3022.2013206

14. Schoeneich, Marta, Michał Habel, Dawid Szatten, Damian Absalon, and Jakub Montewka. "An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways." *Water* 15.1 (2023): 141. DOI: 10.3390/w15010141.

15. Kondrat'eva, N. E., and V. A. Uryvaeva. *Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody na reke Sviri v zimnikh i letnikh usloviyakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1963.

16. Rozovskii, I. L., E. V. Eremenko, and V. A. Bazilevich. *Neustanovivsheesya dvizhenie vodnogo potoka nizhe gidroelektrostantsii i ego vliyanie na ruslo*. Kiev: Naukova dumka, 1967.

17. Grushevskii, M. S. *Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekakh i kanalakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.

18. Graf, W., and L. Suszka. "Unsteady flow and its effect on sediment transport." *Proceedings, 21st IAHR Congress*. Melbourne, Australia, 1985. 540–544.

19. Graf, W. H. *Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry*. Wiley, 1998.

20. Mrokowska, Magdalena M., and Paweł M. Rowiński. "Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments." *Water* 11.5 (2019): 907. DOI: 10.3390/w11050907.

21. Wang, Le, Alan Cuthbertson, Gareth Pender, and Deyu Zhong. "Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs." *Water Resources Research* 55.7 (2019): 5431–5452. DOI: 10.1029/2018WR024413.
22. Muste, Marian, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng, and Felipe Quintero. "Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows." *Journal of hydraulic research* 58.6 (2020): 867–887. DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742.
23. Gladkov, G.L., V. M. Katolikov, and P. S. Rzhakovskaya. "Flow hydraulics and sediment transport parameters in case of unsteady water movement in the lower reaches of waterworks on navigable rivers." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023. 24–43.
24. Gladkov, Gennadii L., and Polina S. Rzhakovskaya. "Hydraulic characteristics of the river flow and sediment transport conditions in the downstream pool of the hydroelectric complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.
25. Gladkov, Gennadii, Viktor Katolikov, Pakhom Belyakov, Polina Rzhakovskaya, and Vitaly Zamyshlyayev. "Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River." *International Journal of Sediment Research* (2024). DOI: 10.1016/j.ijsrc.2024.01.004. [In Press, Corrected Proof].
26. Bombar, Gökçen, Şebnem Elçi, Gokmen Tayfur, M. Şükrü Güney, and Aslı Bor. "Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 137.10 (2011): 1276–1282. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000041.
27. Bombar, Gökçen, Aysegül Özgenc Aksoy, and Mehmet Şükrü Güney. "Effects of Flow Unsteadiness on the Transport of Bimodal Bed Material." *Turkish Journal of Civil Engineering* 34.6 (2023). 99–128. DOI: 10.18400/tjce.1226516.
28. Lee, Kwan Tun, Yi-Liang Liu, and Kai-Hung Cheng. "Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions." *Hydrological processes* 18.13 (2004): 2439–2454. DOI: 10.1002/hyp.1473.
29. Petrovskaya, O. A., and G. L. Gladkov. "On the relationship of bed load transport with the Froude number." *Water Resources* 49.1 (2022): 88–97. DOI: 10.1134/S0097807822010134.
30. Gladkov, Gennadii L. and Pakhom V. Beljakov. "Sediment transport in rivers: dependence of the dunes parameters on the determining factors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.1 (2021): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
31. Grishanin, K. V. *Teoriya ruslovogo protsessa*. M.: Transport, 1972.
32. Kostyuchenko, A. A., and R. V. Zavarzin. "Method of performing and processing measurements to determine the parameters of bed forms." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023. 151–164.
33. Zavarzin, R. V., and O. A. Petrovskaya. "Measurements of bed load transport taking place in the form of dunes: an experimental study of indirect measurement methods." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023. 213–231.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладков Геннадий Леонидович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru
Ржаковская Полина Сергеевна —
аспирант, ассистент
Научный руководитель:
Гладков Геннадий Леонидович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: przhakovskaya@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gladkov, Gennadii 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: gladkovgl@gumrf.ru
Rzhakovskaya, Polina S. —
Postgraduate, assistant
Supervisor:
Gladkov, Gennadii L.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: przhakovskaya@mail.ru

Заварзин Руслан Витальевич —
аспирант, младший научный сотрудник
Научный руководитель:
Католиков Виктор Михайлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
ФГБУ «Государственный гидрологический
институт»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23
e-mail: zavarzr@gmail.com

Zavarzin, Ruslan V. —
Postgraduate, junior researcher
Supervisor:
Katolikov, Viktor M —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
State Hydrological Institute
23 2nd line of Vasilyevsky Island,
St. Petersburg,
199004, Russian Federation
e-mail: zavarzr@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 21 марта 2024 г.
Received: March 21, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211

SIMULATION OF SEA PASSENGER PORT OPERATION ON THE BASIS OF A DIGITAL TRANSPORT MODEL TAKING INTO ACCOUNT DIFFERENT PRIORITIES OF CRUISE AND FERRY VESSELS

N. N. Maiorov, V. A. Fetisov, A. A. Silina

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

New approach for the analysis of the incoming flow of cruise or ferry ships, taking into account the division into sizes and the formation of new signs of berths "priority", is proposed. To solve the problem of multiscenario modeling it is proposed to use Poisson and normal distributions. Also, in order to extend the model of ship requests prioritization, it is proposed to consider the situation when the intervals between ship calls in the flow of ships obey gamma distributions that take into account the after-effects of the flow. The reference data in this paper are the known intensities of operation of the Passenger Port of St. Petersburg "Sea Façade" during the navigation period. To verify the results, the data for the maximum monthly load of the sea passenger port are chosen. The performed analysis of berths loading is presented in the paper and the data on intervals between cruise and ferry ships are investigated. To solve the problem of "multiscenario modeling", a new digital model of the sea passenger port is presented. The digital model aims at solving the problems of "sea cruise/ferry line — sea passenger port/terminal" systems research, taking into account the possibility of dynamic change of parameters by the intensity of work. The justification of using "optimization experiment" is presented; the results of the research performance both without the "priority" parameter and taking into account the "priority", as well as the results of the runs of the developed special digital model of the passenger port are given. On the basis of the results of multi-scenario modeling, new results, proving that the introduction of cruise or ferry ships "priority" into the model by berths achieves the effect of increasing the throughput capacity, are obtained. Based on the presented modeling, the effectiveness of including a study based on gamma distribution is confirmed. The obtained results of multiscenario modeling with the allocation and implementation of "priority" in conjunction with the use of macro-level regional planning based on Circos intensity diagrams allow us to form a complete data set for multi-criteria analysis of changes in response to the influence of the external environment and assessment of the sea passenger port position in the sea region. The presented methodology, developed models on "prioritization" and modeling results can be applied to other maritime ports.

Keywords: sea passenger port, ferry line intensities, berth congestion, simulation model, mass service systems, infrastructure modernization, digital transport model.

For citation:

Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Silina. "Simulation of sea passenger port operation on the basis of a digital transport model taking into account different priorities of cruise and ferry vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211.

УДК 65.012.1, 656.072

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ПРИОРИТЕТОВ КРУИЗНЫХ И ПАРОМНЫХ СУДОВ

Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Силина

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложен новый подход для анализа входящего потока круизных и паромных судов с учетом разделения на размеры и формирования новых признаков «приоритетности» причалов. Для решения задачи многогосценарного моделирования предлагается использование пуассоновского и нормального распределений.

Также для расширения модели приоритетности заявок судов предлагается рассмотреть ситуацию, когда в потоке судов интервалы между судозаходами подчиняются гамма-распределениям, учитывающим последствие потока. Эталонными данными в работе выбраны известные интенсивности работы «Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» за навигацию. Для проверки результатов выбраны данные для максимальной месячной загрузки морского пассажирского порта. В статье представлен анализ загруженности причалов, исследованы данные по интервалам между круизными и паромными судами. Для решения задачи «многосценарного моделирования» представлена новая цифровая модель морского пассажирского порта, направленная на решение задач исследования систем «морская круизная / паромная линия — морской пассажирский порт / терминал», с учетом возможности динамического изменения параметров по интенсивностям работы. Представлено обоснование использования «оптимизационного эксперимента», приведены результаты выполнения исследования как без параметра «приоритетности», так и с учетом «приоритетности», а также результаты «прогнозов» разработанной специальной цифровой модели пассажирского порта. На основе результатов многосценарного моделирования получены новые данные, доказывающие, что при введении в модель «приоритетности» круизных или паромных судов по причалам достигается эффект возрастания пропускной способности. На основе представленного моделирования подтверждается эффективность включения исследования на основе гамма-распределения. Полученные результаты многосценарного моделирования с выделением и реализацией «приоритетности» в совокупности с использованием на макроуровне регионального планирования на основе круговых диаграмм интенсивностей Circos позволяют сформировать полный набор данных для многокритериального анализа изменений в ответ на влияние внешней среды и оценки положения морского пассажирского порта в регионе моря. Представленная методика, разработанные модели по выделению «приоритетности» и результаты моделирования могут быть применены для других морских пассажирских портов и терминалов, что определяет универсальность представленного подхода.

Ключевые слова: морской пассажирский порт, интенсивности паромных линий, загруженность причалов, имитационная модель, системы массового обслуживания, модернизация инфраструктуры, цифровой двойник.

Для цитирования:

Майоров Н. Н. Моделирование работы морского пассажирского порта на основе цифровой транспортно-портной модели с учетом различных приоритетов круизных и паромных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Силина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211.

Введение (Introduction)

Морской пассажирский порт в транспортной системе региона и города играет важнейшую роль, являясь сложной технологически взаимосвязанной системой, направленной на обслуживание пассажиропотока и обработку сопутствующих грузов и транспортных средств с высоким уровнем оперативности. Необходимо отметить, что исследованием сферы морских круизов занимались многие ученые и специалисты [1], [2], но на основе детального анализа видно, что представленные исследования затрагивают только отдельные выбранные области (например, только эксплуатационные вопросы развития морских круизных линий либо рассмотрение только отдельных морских пассажирских портов и терминалов [3]–[5].

Успешность региона и города, в котором располагается морской пассажирский порт [7], зависит от многих факторов и условий, одним из которых является достижение непрерывного развития. Морской пассажирский порт находится под влиянием многих как внутренних, так и внешних воздействий, являющихся источником начала формирования обратных управляющих воздействий для достижения нового уровня или стабилизации существующего уровня интенсивностей работы морских паромных и круизных линий, некоторого стабильного уровня развития круизного сектора в регионе. Развитие морского пассажирского порта или терминала напрямую влияет на развитие региона, наземной околопортовой транспортной инфраструктуры, логистических сервисов и создание новых сегментов для пользователей порта и элементов инфраструктуры.

В настоящее время сфера морских круизных и паромных перевозок, несмотря на некоторый временный спад по причине ограничений Covid-19, находится в стадии активного восстановления и развития. Статистические данные по другим регионам морей приведены в работах [4], [6],

а также аналитических отчетах по отрасли [8], [9]. Аналитические данные по восстановлению пассажиропотока приведены на рис. 1, на котором представлены мировые статистические данные по количеству причалов для морских круизных и паромных линий до 2026 г., согласно [9], и линия тренда, характеризующая увеличение количества введенных новых причалов.

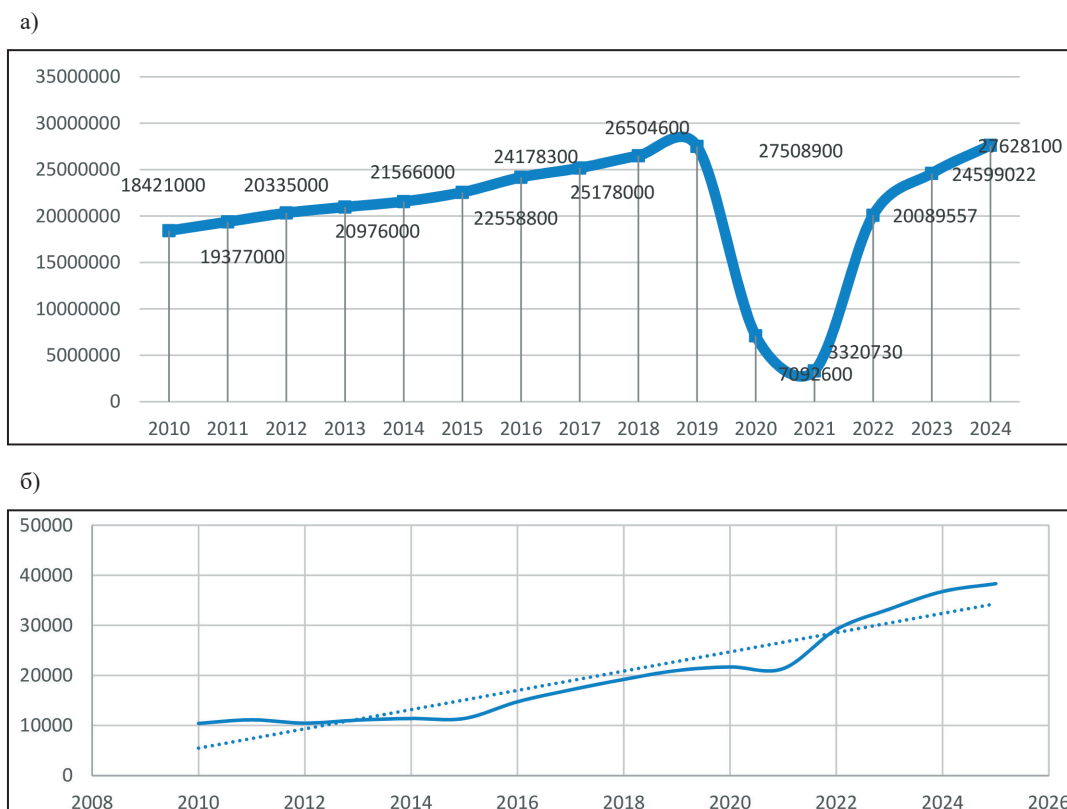


Рис. 1. Аналитические данные, характеризующие активное восстановление пассажиропотока морских круизных и паромных линий (а), и аналитические данные роста количества причалов для морских круизных и паромных судов согласно аналитическому отчету CIN (б)

Fig. 1. Analytical data characterizing the active restoration of passenger traffic of sea cruise and ferry vessels (a), and analytical data on the growth in the number of berths for sea cruise and ferry ships according to the CIN analytical report (b)

Приведенные на рис. 1 данные, с одной стороны, подтверждают активное развитие сферы морских пассажирских перевозок, а с другой — определяют тенденцию на ввод новых и модернизацию существующих причалов в портах под новые круизные суда. Ситуация активного влияния внешней среды и современных трендов на увеличение размеров новых круизных и паромных судов обуславливает необходимость модернизации причалов. Вместе с тем из-за конкуренции за пассажиропоток в регионах морей, например, в регионе Балтийского моря, любые изменения в маршрутных сетях приводят к уменьшению или наоборот увеличению роли порта в регионе за счет связанности портов. Поэтому лицам, принимающим решение, необходимо иметь комплекс цифровых решений, цифровых двойников, которые позволяют выполнить многокритериальную комплексную оптимизацию «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт – околопортовая транспортная наземная инфраструктура».

Объектом исследования в работе выбрано исследование взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт». Актуальность исследования обусловлена тем, что несмотря на плановые данные судозаходов, из-за влияния внешней среды возможны изменения как по причине возникновения вероятностных процессов, так и ввиду формирования новых стратегических требований по модернизации инфраструктуры для соответствия новым требованиям отрасли. Объектом исследования является входящий поток круизных

и паромных судов, причалы морского пассажирского порта, которым назначаются определенные приоритеты.

Предметом настоящего исследования является математическая проблема исследования входящего потока судов с формированием приоритетных заявок в очереди с помощью многосценарного моделирования и моделей систем массового обслуживания. Данная модель является частной, рассматриваемой авторами в работе [10]. Возникшая ситуация требует разработки нового аппарата и программной реализации признака «приоритетности» для моделирования различной интенсивности круизных и паромных судов в специализированной цифровой модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Определение положения морского пассажирского порта в регионе моря на основе дискретного набора интенсивностей, фиксация изменений в маршрутных сетях с автоматическим определением вклада порта в региональную сферу пассажирских перевозок представлены в работах [11], [12]. В данной модели на основе построения Circos круговых диаграмм интенсивностей основной переменной исследуются изменения в маршрутных сетях в выбранном регионе, например, Балтийском море [12], [13]. Представим основную модель тренда на увеличение размеров круизных и паромных судов и изменения в входящем потоке судов для морского пассажирского порта или терминала (рис. 2).

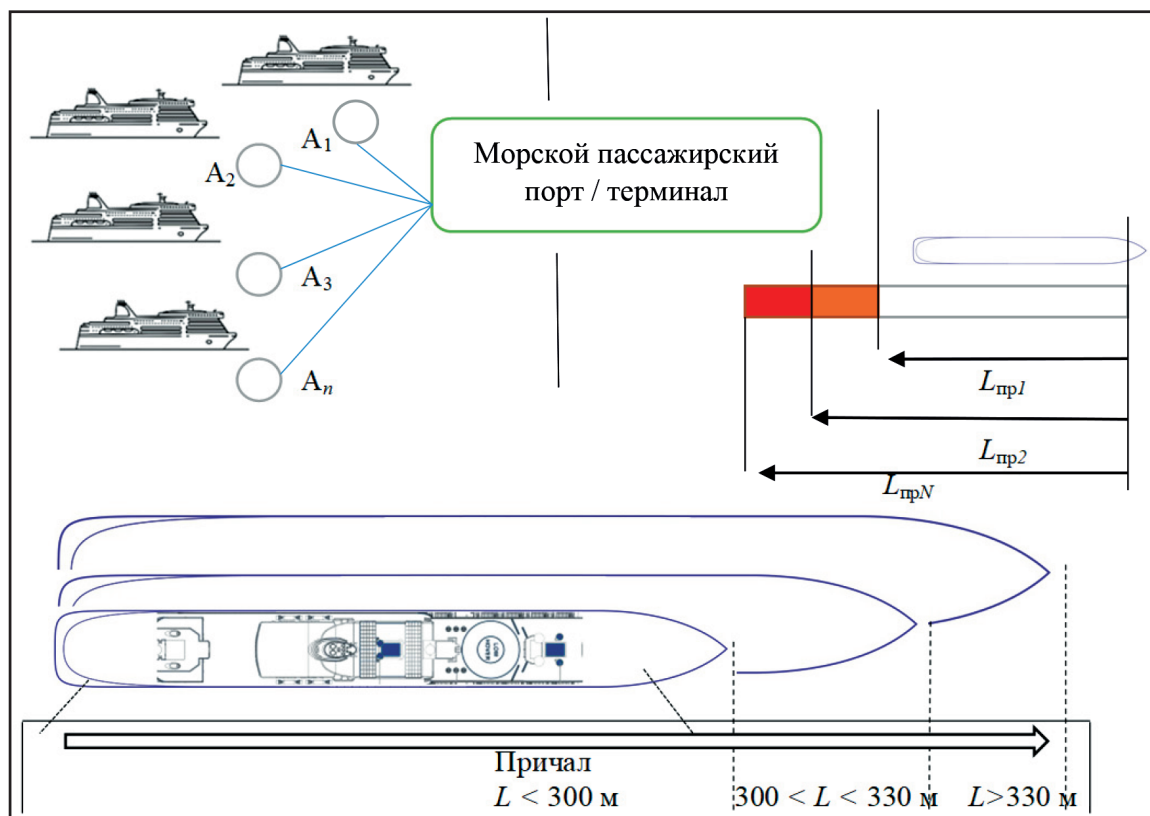


Рис. 2. Модель влияния тренда по увеличению размера круизных и паромных судов и изменений в маршрутных сетях

Условные обозначения:

$A_1, A_2, \dots, A_n$ — входящий поток, интенсивности работы круизных / паромных линий, образующих входящий поток; $L_{пр1}, L_{пр2}, \dots, L_{прN}$ — потребность в увеличении длины причала в связи с увеличением габаритов судов;

L — размеры круизного или паромного судна с учетом тренда на увеличение

Fig. 2. Model of the influence of the trend towards increasing

the size of cruise and ferry vessels and changes in route networks:

$A_1, A_2, \dots, A_n$ — incoming flow, operating intensity of cruise/ferry lines forming the incoming flow;

$L_{пр1}, L_{пр2}, \dots, L_{прN}$ — the need to increase the berth length due to the increase in vessels dimensions;

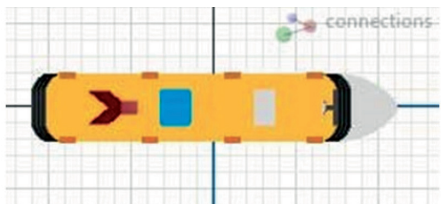
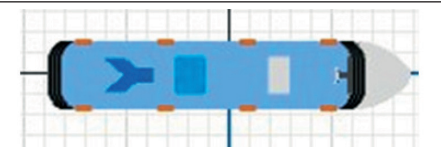
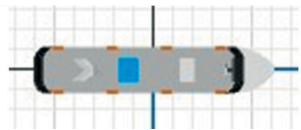
L — dimensions of a cruise or ferry vessel, taking into account the increasing trend

Определяющим фактором эффективности функционирования и развития морского пассажирского порта являются входящие потоки круизных или паромных судов. Для формирования решения о результатах исследования положения порта в регионе необходимо иметь набор сценариев интенсивностей с добавлением переменной признака «приоритетности». Объектом исследования выбрана инфраструктура АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург “Морской фасад”» [14], в котором под влиянием внешней среды были модернизированы причалы 1 и 7 для приема крупных лайнеров. Поэтому одним из параметров приоритетности судов для практической реализации *цифрового двойника* является закрепление появившегося при моделировании большого лайнера за заданными причалами в порту.

Разработка цифрового двойника в среде AnyLogic [15], [16] позволяет реализовать возможность многосценарного моделирования с автоматическим формированием Dataset различных вариантов работы порта и определения загруженности причалов. В табл. 1 приведена графическая модель разделения входного потока паромных / круизных судов с выделением отдельных агентов, за которыми закрепляется атрибут размера судна.

Таблица 1

Графическое представление признака «приоритетности» круизных / паромных судов в очереди в морской пассажирский порт

Тип судна	Имя агента в модели	Размеры реальных судов	Изображение судна с приоритетом в цифровой модели в среде Anylogic
Крупный лайнер	CruiseShipsXL	> 288 м	
Лайнер среднего размера	CruiseShips	220–288 м	
Небольшой паром	CruiseFerries	< 220 м	

Для исследования различных вариантов загруженности причалов необходимо использовать аппарат моделирования. Классическая модель оценки интенсивности движения, в том числе круизных и паромных судов, основана на пуассоновском законе распределения [17], [18] (на основе моделей систем массового обслуживания). Следовательно, интервал между прибытиями судов подчиняется экспоненциальному распределению с плотностью

$$f_k(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Пуассоновский поток является стационарным, ординарным и не имеет последействия. Однако для исследования различных вариантов необходимо рассмотреть несколько законов распределения. Для моделирования входного потока круизных и паромных судов для системы причалов морского пассажирского порта были выбраны такие законы распределения, как пуассоновский нормальный. Также для расширения модели приоритетности заявок предлагается рассмотреть ситуацию, когда в потоке судов интервалы между судозаходами подчиняются гамма-распределению [19]–[21], учитывающему последствие потока. Выбранные математические модели законов распределения приведены в табл. 2.

**Выбранные для моделирования математические модели,
описывающие интенсивности поступления круизных или паромных судов
для цифровой модели порта и исследования разноприоритетных заявок**

Пуассоновское распределение	Нормальное распределение	Гамма-распределение
$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!},$ где λ — среднее число заявок (круизных или паромных судов) простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени; t — время; k — количество заявок.	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$ где μ — среднее количество заявок; σ — среднеквадратическое отклонение.	$f(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(r)};$ $f(t_v) = \frac{\lambda(t_0 + t_v)(\Lambda_{t_0, t_0 + t_v})^{r-1} e^{-\Lambda_{t_0, t_0 + t_v}}}{\Gamma(r)},$ где $t_v \geq 0$ — интервал между приходами круизных судов; λ — интенсивность входящего потока судов; r — закон распределения ($r > 0$); $\Gamma(r)$ — гамма-распределение. Для работы с нестационарными потоками судов используется «ведущая функция» $\Lambda(t)$, которая на промежутке $[t, t + \Delta t]$ выражена следующим образом: $\Lambda_{t, t+\Delta t} = \int_t^{t+\Delta t} \lambda(t) dt.$

В статье [22] представлена модель исследования взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт» на основе построения круговых диаграмм интенсивностей Circos [23], позволяющих в определенный дискретный момент времени отразить интенсивности в регионе Балтийского моря и в процентах определить вклад порта в сферу морских пассажирских перевозок. В статье [24] рассмотрена модель построения замкнутых маршрутов. Следующим шагом необходимо представить различные варианты моделирования интенсивностей судозаходов с учетом современных трендов. Таким образом обосновывается введение в модель и методику понятия «выделение приоритетности». «Оконная форма» с представлением логики модели для исследования интенсивности круизных и паромных линий в программной среде Anylogic приведена на рис. 3.

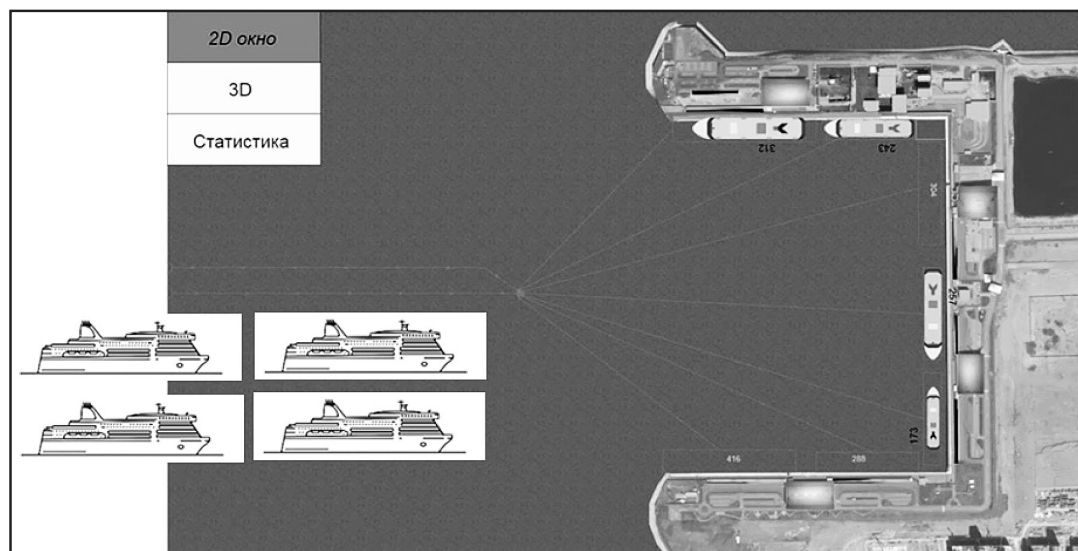


Рис. 3. Логика реализации модели поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт в цифровой модели (цифровом двойнике порта)
 Fig. 3. Logic for implementing a model for the arrival of cruise and ferry vessels at a sea passenger port in a digital model (digital twin of the port)

Известные данные по интенсивностям судозаходов круизных и паромных судов в 2015–2019 гг. для АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург “Морской Фасад”» принимаются как эталонные и будут применены в дальнейшем для оценки достоверности моделирования и возможных сценариев. На основе моделирования можно выполнить оценку годовых значений судозаходов, предварительно определив прогнозный разброс значений и выполнив исследование за определенные месяцы работы.

Результаты исследования (Results of the research)

На основе известных данных по интенсивностям судозаходов для АО «Пассажирского порта Санкт-Петербург “Морской Фасад”» в 2015–2019 гг. были определены характеристики судов и время их стоянки в порту. В морском пассажирском порту семь причалов. Итоговое распределение судов по причалам приведено на рис. 4.

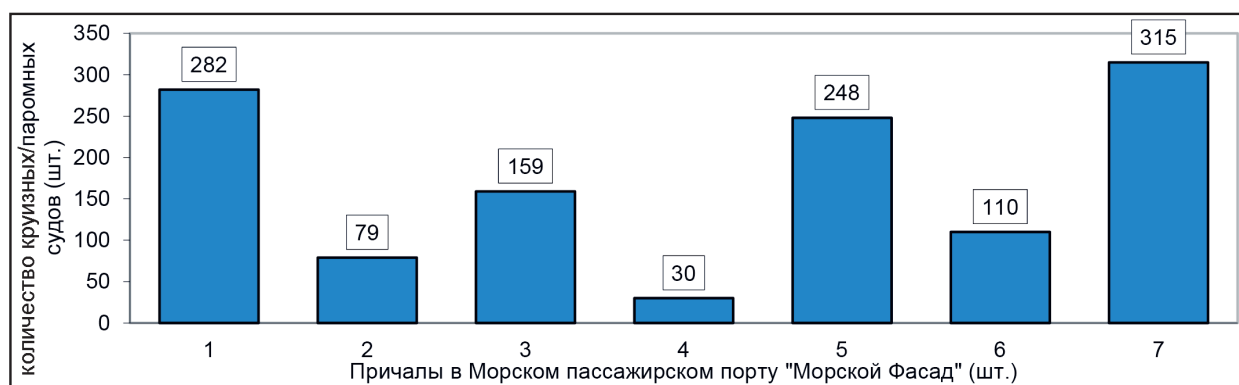


Рис. 4. Распределение судов по причалам в морском пассажирском порту

Fig. 4. Distribution of vessels by berths in the sea passenger port

Данные, приведенные на рис. 5, позволяют сделать вывод о загруженности причалов 1 и 7 в основном крупными круизными судами. Фрагмент исходных данных (сентябрь и октябрь 2019 г.) для следующего моделирования, оценки времени стоянки в пассажирском порту приведен в табл. 3.

Таблица 3

Пример представления исходных данных по интенсивностям работы

№ п/п.	Вокзал	Причал	Название судна	Прибытие	Отправление	Продолжительность стоянки в порту (дн.)
1	МВ-3	ПАС-3	Astoria	26.09.2019 8:00	27.09.2019 18:00	1,42
2	МВ-1	ПАС-7	Norwegian Getaway	27.09.2019 7:00	28.09.2019 19:00	1,50
3	МВ-1	ПАС-7	Pacific Princess	29.09.2019 7:00	30.09.2019 18:00	1,46
4	МВ-1	ПАС-6	Magellan	02.10.2019 7:00	03.10.2019 19:00	1,50
5	МВ-1	ПАС-7	AIDamar	03.10.2019 7:00	03.10.2019 19:00	0,50
6	МВ-1	ПАС-7	Norwegian Getaway	06.10.2019 7:00	07.10.2019 19:00	1,50
7	МВ-1	ПАС-7	AIDAprima	08.10.2019 8:00	08.10.2019 20:00	0,50
8	МВ-1	ПАС-7	Balmoral	11.10.2019 7:30	12.10.2019 18:00	1,44
9	МВ-1	ПАС-7	Norwegian Getaway	15.10.2019 7:00	16.10.2019 19:00	1,50
10	МВ-1	ПАС-7	AIDAaura	20.10.2019 7:00	21.10.2019 18:00	1,46

На основе анализа интенсивностей работы выберем пиковое известное значение, равное 68 судов (данные на июль 2019 г. как эталонные для проверки). «Оконные формы» разработанного специального цифрового двойника морского пассажирского порта в программной среде AnyLogic с учетом визуализации модели работы в 2D- и 3D-вариантах приведены на рис. 5.

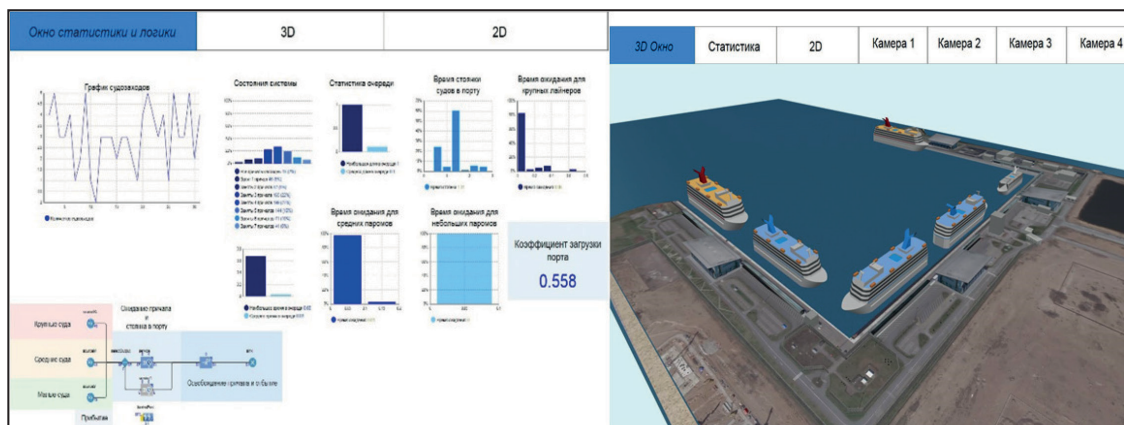


Рис. 5. «Оконные формы» разработанной цифровой модели морского пассажирского порта с учетом реализации различных приоритетов

Fig. 5. “Window shapes” of the developed digital model of the sea passenger port, taking into account the implementation of various priorities

Отличительной особенностью модели являются реализация выбранных законов распределения, возможности сравнения с дискретным расписанием движения, выполнение специализированного оптимизационного эксперимента [25]–[27], реализация динамического изменения сценариев работы входного потока круизных и паромных судов. Оптимизация созданной модели в AnyLogic заключается в последовательном выполнении нескольких прогонов модели с различными значениями параметров и нахождении оптимальных для данной задачи значений параметров. Общий алгоритм оптимизации состоит из нескольких последовательных прогонов выбранной модели морского пассажирского порта с различными значениями параметров.

Модель выполняется в приведенной последовательности:

1. Оптимизатор выбирает допустимые значения оптимизационных параметров и запускает созданную модель морского пассажирского порта с этими значениями.
2. Завершив «прогон» модели, оптимизатор вычисляет значение целевой функции на момент завершения.
3. Оптимизатор анализирует полученное значение, изменяет значения оптимизационных параметров в соответствии с алгоритмом оптимизации и процесс повторяется заново.
4. Оптимизационный эксперимент для пуассоновского закона распределения представлен на рис. 6.

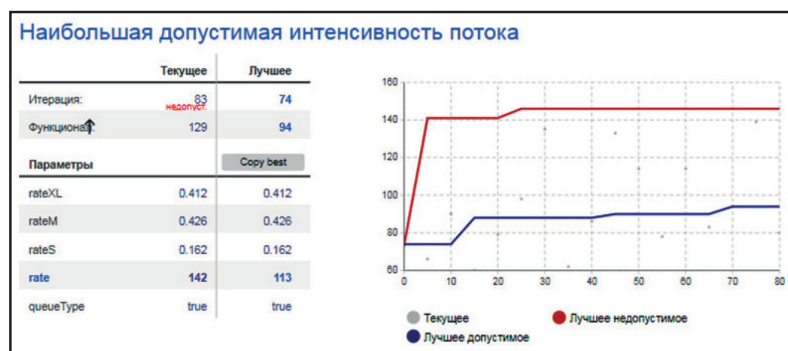


Рис. 6. «Оконная форма» результата выполнения оптимизационного эксперимента после выбора моделирования интенсивности круизных и паромных судов по пуассоновскому закону распределения

Fig. 6. “Window shape” of the optimization experiment result after choosing the modeling of cruise and ferry vessels intensity according to the Poisson distribution law

Результаты выполненных экспериментов при моделировании потока круизных и паромных судов с учетом признаков «без приоритетов судов», «с приоритетами» приведены в табл. 4 и 5. Для каждого вида распределения входного потока было проведено более 200 экспериментов в цифровой транспортной модели морского порта в среде AnyLogic [15]. Результаты десяти прогонов модели приведены в табл. 4.

Таблица 4

Моделирование потоков судов

№ п/п.	Пуассоновское распределение		Гамма-распределение		Нормальное распределение	
Без приоритетности						
1	92	142	82	142	87	143
2	85	152	82	150	87	148
3	88	155	93	150	82	152
4	88	156	86	149	81	156
5	83	152	64	159	86	157
6	90	152	99	159	84	157
7	94	155	85	159	77	157
8	82	155	86	159	78	157
9	77	154	83	159	83	156
10	86	154	87	158	81	157
С приоритетностью						
1	86	151	90	149	83	157
2	101	155	98	150	94	157
3	81	150	92	152	97	155
4	88	156	95	157	96	157
5	79	148	85	158	90	155
6	77	152	87	158	78	156
7	87	153	94	158	95	153
8	89	157	100	158	85	155
9	100	156	86	155	91	156
10	81	158	85	154	83	152

Графические результаты экспериментов с учетом в модели приоритетов и без них приведены на рис. 7.

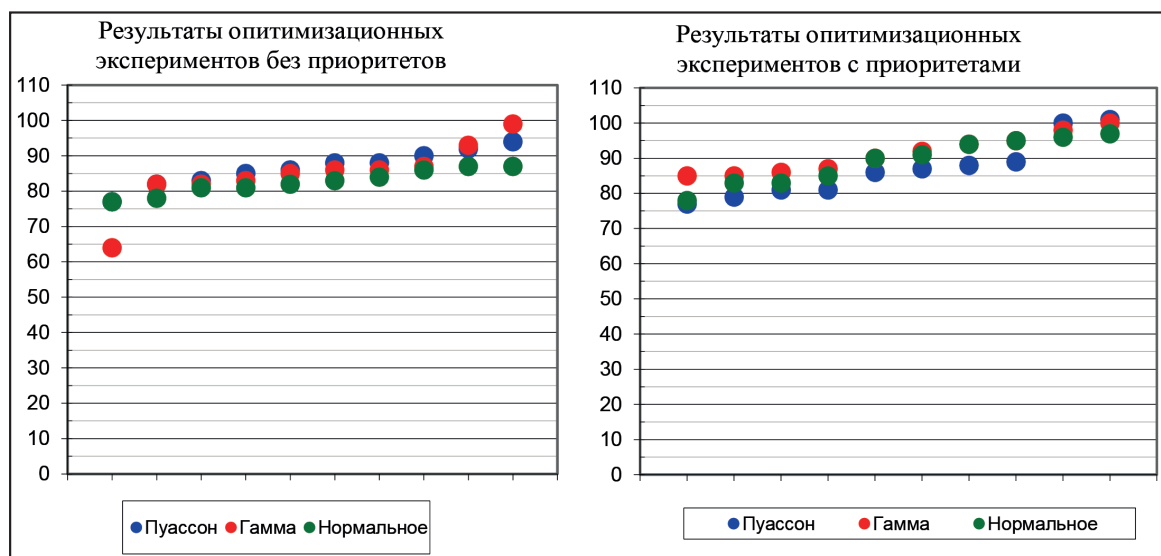


Рис. 7. Результаты оптимизационных экспериментов при различных интенсивностях круизных и паромных судов в пиковый месяц навигации

Fig. 7. Results of optimization experiments for different intensities of cruise and ferry vessels during the peak month of navigation

На рис. 7 приведены данные, которые в результате выполнения оптимизационных экспериментов составили допустимые значения интенсивностей. Для проверки корректности моделирования использовались известные данные по интенсивностям работы. Представленное поле значений, как и в приведенной выборке, позволяет сформировать область допустимых значений интенсивностей судозаходов с учетом приоритетов судов.

Обсуждение (Discussion)

Согласно модели развития портов автора Bird J. Anyport одним из принципов развития морского порта с технологической и инфраструктурной точки зрения является модернизация перегрузочного оборудования, специализация погрузочно-разгрузочного оборудования, специализация причального фронта, разделение на грузовые районы и выполнение специализации отдельных районов и терминалов. Таким образом, модель развития морского пассажирского порта с учетом географических особенностей формируется либо как отдельная модель порта, когда порт строится отдельно специально, либо как логичная стадия развития крупного порта, в котором выделяется отдельный район — *морской пассажирский порт*. Развитие морского пассажирского порта оказывает непосредственное влияние на развитие региона, что определяет необходимость решения задачи стратегического планирования. Горизонт планирования формируется в каждом случае индивидуально — либо на ближайшую навигацию, либо ставится задача изменения порта в регионе и привлечение как можно большего количества круизных и паромных линий, а также формирование полного круизного маршрута с началом и завершением в морском пассажирском порту.

Любые изменения зависят от возможностей инфраструктуры. Поэтому для того, чтобы выйти на более высокий уровень интенсивности работы, необходимо выполнять модернизацию инфраструктуры путем ввода новых пассажирских терминалов и расширения причалов. Ввиду влияния внешней среды с позиций современного тренда на строительство крупных новых круизных судов, подробно исследованного в данной статье, перед руководителями порта ставится задача либо построить новые причалы под новый тип судов, либо выполнить модернизацию существующих. Невыполнение действий приведет в конечном итоге к исключению порта из маршрутной сети определенных компаний и, соответственно, к уменьшению пассажиропотока и потерям региона, города. К таким примерам относится ответ на внешний вызов (ввод новых направлений в регионе) и влияние тенденции увеличения габарита круизных судов, а именно увеличения длины судна более 330 м. АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург “Морской фасад”» успешно выполнил проект строительства выносных палов, увеличив длину причалов № 6 и № 7 (причального фронта) на 108,6 м. В данном случае он стратегически реализовал возможность приема крупных морских лайнеров, тем самым включив и сохранив город Санкт-Петербург в новой системе круизных и паромных маршрутов. Однако необходимо иметь в виду взаимное влияние морских пассажирских портов друг на друга в регионах морей, как, например, в выбранном регионе Балтийского моря. В итоге лицу, принимающему решение, необходимо основываться не на опыте отрасли либо личном опыте, а принимать решение на основе получения данных Dataset, использовать многопараметрическую оптимизацию и исследовать взаимодействие систем «морская паромная / круизная линий – морской пассажирский порт – наземная инфраструктура».

Выполненное исследование направлено на решение проблемных вопросов при изучении систем: «морская паромная / круизная линий – морской пассажирский порт». Лицам, принимающим решение по модернизации порта, предлагается разработанная новая цифровая транспортная модель (цифровой двойник) с возможностью визуализации движения паромных судов как в 2D, 3D пространственных вариантах, а также использование средств для динамического изменения данных интенсивности работы круизных линий. Для решения задачи многосценарного моделирования, основанного как на реальных, так и прогнозных данных по планам судозаходов круизных и паромных судов, выполнено использование пуассоновского, нормального и гамма-распределений, позволяющих сформировать набор данных для последующего анализа и оценки инфраструктурных изменений.

Необходимо отметить, что в данном случае цифровая модель морского порта является специализированным инструментальным средством, создаваемым для каждого морского пассажирского порта отдельно ввиду его уникальных особенностей. Созданные алгоритмы позволяют обеспечить сближение реальных процессов в модельной среде с большой точностью.

Представленный в статье *цифровой двойник* позволяет на качественно новом уровне решить задачу моделирования систем «морская паромная / круизная линии – морской пассажирский порт» с учетом выделения приоритетов в потоке судов или специализации причалов. Представленное решение в дополнение к данным круговых интенсивностей в регионе Балтийского моря Circus, позволяет сформировать полную оценочную модель изменения веса порта в регионе после обоснованного принятия решений по модернизации и созданию новых логистических сервисов. Реализованная возможность использования оптимизационного эксперимента позволяет сформировать определенные поля полезностей и использовать модели и методы принятия решений при неопределенности, что значительно увеличивает практическое поле проводимых исследований.

Результаты (Results)

Представленная новая цифровая модель морского пассажирского порта с реализованной возможностью приоритетности в потоках судов и специализации причалов позволяет выполнить многосценарное моделирование различных интенсивностей как на основе реальных эталонных данных, так и прогнозных сценариев, выполненных на основе пуассоновского, нормального и гамма-распределений. Эталонными для проведения исследования и проверки предлагаемой модели являлись данные «Пассажирского порта Санкт-Петербург “Морской фасад”», интенсивность его работы в течение различных временных периодов и пиковая интенсивность в 2019 г.

На основе анализа результатов, приведенных на рис. 7, можно сделать следующие выводы:

1. В процессе моделирования потока судов без приоритетов использование нормального распределения дает более стабильные результаты, пуассоновское распределение показывает большую пропускную способность и сохраняет стабильность работы нормального распределения, гамма-распределение дает больший разброс, но и большие цифры успешно обслуженных круизных и паромных судов в короткие сроки.

2. При введении в модель приоритетности судов по причалам видно, что эффект от приоритетности ярко выражен — возросла пропускная способность. Все выбранные распределения показывают близкие значения.

3. При выполнении моделировании реализована задача использования как эталонных данных по интенсивностям, так и динамических данных с возможностью обновления. Полученные результаты сценариев моделирования подтвердили необходимость выполнения модернизации и специализации причалов, что и было реализовано для данного порта, подтвердив эффективность предложенной модели.

4. Представленные результаты подтвердили эффективность создания цифровой транспортной модели и введения моделей оценки с приоритетностями заявок и приоритетностью причалов. Можно утверждать, что предложенную модель исследования систем «морской пассажирский порт – морская паромная / круизная линия» с учетом внедрения в контур принятия решения цифровой транспортной модели необходимо использовать для принятия решений по модернизации инфраструктуры и формирования обоснованного перехода на новую стадию развития.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнено обоснование эффективности исследования взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт» на основе многовариантного моделирования интенсивностей судозаходов для формирования набора данных Dataset и последующего прогнозирования.

2. Обоснована и подтверждена экспериментально необходимость учета в моделях развития морских пассажирских портов терминалов влияния внешней среды в форме параметров увеличения

габаритов новых круизных и паромных судов и исследования интенсивностей на основе круговых диаграмм Circos.

3. Представлены аналитические данные по отрасли, подтверждающие актуальность задачи модернизации морских пассажирских портов, модернизации причалов и изменений в маршрутных сетях.

4. Предложена новая модель представления и назначения «приоритетности» круизных или паромных судов для выполнения моделирования и отображения в динамике в цифровой модели морского пассажирского порта.

5. Представлены результаты анализа загруженности причалов «Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад», интервалов между судозаходами и загруженности причалов.

6. Обоснован выбор пуассоновского, нормального и гамма-распределений как основного математического аппарата для исследования различных интенсивностей круизных и паромных линий, в том числе с приоритетностью.

7. Обосновано использование «оптимизационного эксперимента» в цифровой транспортной модели для формирования набора данных для последующего принятия решения.

8. Представленные результаты моделирования в цифровой транспортной модели позволяют утверждать, что при введении в модель «приоритетности» судов по причалам видно, что эффект от приоритетности ярко выражен — возросла пропускная способность.

9. При использовании предложенной модели не требуется проводить исследования достоверности (достаточной репрезентативности количества испытаний).

10. Подтверждено, что разработка цифровой транспортной модели морского пассажирского порта в совокупности с практической реализацией региональных моделей портов в программном инструменте Circos формирует полный набор данных для обоснованного принятия решения и определения положения морского пассажирского в сфере пассажирских перевозок по отношению к другим портам.

11. Разработанный цифровой двойник необходимо использовать лицам, принимающим решение, при стратегическом развитии морского пассажирского порта или терминала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпилько С. П. Морские круизы: теория и практика / С. П. Шпилько, Н. В. Андропова, Р. В. Чударев. — М.: Советский спорт, 2012. — 147 с.
2. Титов А. В. Современные тенденции развития морских портов в мире и их влияние на портовую индустрию России / А. В. Титов, Д. Б. Ивашкович // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 1. — С. 115–124.
3. Bird J. Seaports and Seaport Terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1980. — 117 p.
4. Brida J. G. Cruise Passengers in a Homeport: A Market Analysis / J. G. Brida, M. Pulina, E. Riaño, S. Z. Aguirre // Tourism Geographies. — 2013. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 68–87. DOI: 10.1080/14616688.2012.675510.
5. Ćorluka G. Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
6. Barron P. Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market / P. Barron, A. B. Greenwood // Tourism in Marine Environments. — 2006. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.
7. Майоров Н. Н. Моделирование маршрутов морских паромных перевозок на основе теории графов в контексте стратегического планирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 782–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-782-793.
8. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 22.02.2024).
9. Cruise Industry News [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.cruiseindustrynewswire.com/> (дата обращения: 22.02.2024).

10. Майоров Н. Н. Этапы эволюции взаимоотношения города и морского пассажирского порта на примере Санкт-Петербурга / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Логистика: современные тенденции развития: материалы XIX Международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова, 2020. — С. 279–285.

11. Майоров Н. Н. Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов и сети паромных линий в регионе Балтийского моря / Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.

12. Krile S. Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. — Pp. 3869. DOI: 10.3390/su13073869.

13. Krile S. The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // Transport Problems. — 2020. — Vol. 15. — Pp. 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.

14. АО «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portspb.ru/> (дата обращения: 15.02.2024).

15. AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 01.02.2024).

16. Майоров Н. Н. Вероятностная модель прогнозирования прибытия круизных или паромных судов в морской порт для оценки инфраструктуры / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 169–180. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-169-180.

17. Chládek P. On some aspects of graph theory for optimal transport among marine ports / P. Chládek, D. Smetanová, S. Krile // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. — 2018. — Vol. 101. — Pp. 37–45. DOI: 10.20858/sjsutst.2018.101.4.

18. Fernández-Gámez M. A. A dynamic modelling approach to manage the cruise port of call / M. A. Fernández-Gámez, L. Valcarce-Ruiz, R. Becerra-Vicario, J. Diéguez-Soto // Research in Transportation Business & Management. — 2022. — Vol. 43. — Pp. 100818. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100818.

19. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие; 2-е изд., перераб. и доп. / Д. Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 496 с.

20. Язвенко М. Р. Моделирование морского грузового порта как системы массового обслуживания в среде AnyLogic / М. Р. Язвенко, А. Г. Морозков // Системный анализ и логистика. — 2020. — № 4 (26). — С. 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.

21. Tsamboulas D. How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination / D. Tsamboulas, P. Moraiti, G. Kouloupoulou // Transportation Research Record. — 2013. — Vol. 2330. — Is. 1. — Pp. 24–30. DOI: 10.3141/2330-04.

22. Maiorov N. Simulation of the route network and ferry traffic intensity based on the process of discretization and circos plot intensity diagram / N. Maiorov, V. Fetisov, S. Krile, D. Miskovic // Transport Problems. — 2019. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 21–30. DOI: 10.20858/tp.2019.14.4.2.

23. Circos 2024 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sourceforge.net/projects/jcircos/> (дата обращения: 22.02.2024).

24. Krile S. Efficient heuristic for non-linear transportation problem on the route with multiple ports / S. Krile // Polish Maritime Research. — 2013. — Vol. 20. — Is. 4. — Pp. 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.

25. Оптимизационный эксперимент в AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://anylogic.help/ru/anylogic/experiments/optimization-experiment.html> (дата обращения: 01.03.2024).

26. Воевудский Е. Н. Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов / Е. Н. Воевудский, М. Я. Постан. — М.: Транспорт, 1987. — 318 с.

27. Майоров Н. Н. Исследование путей разработки точных цифровых моделей для объектов и узлов транспортной инфраструктуры / Н. Н. Майоров, А. А. Добровольская, В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 4 (30). — С. 114–121. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-114-121.

REFERENCES

1. Shpil'ko, S. P., N. V. Andronova, and R. V. Chudarev. *Morskije kruizy: teoriya i praktika*. М.: Sovetskii sport, 2012.

2. Titov, Alexey Valerievich, and Danila Borisovich Ivashkovich. "Modern ways of development of the world sea ports and their influence on the port industry in Russia." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2016): 115–124.
3. Bird, J. *Seaports and Seaport Terminals*. London: Hutchinson University Library, 1980.
4. Brida, Juan Gabriel, Manuela Pulina, Eugenia Riaño, and Sandra Zapata Aguirre. "Cruise passengers in a homeport: A market analysis." *Tourism Geographies* 15.1 (2013): 68–87. DOI: 10.1080/14616688.2012.675510
5. Ćorluka, Goran, Ivan Peronja, and Dejan Tubić. "Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective." *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
6. Barron, Paul, and Ana Bartolome Greenwood. "Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market." *Tourism in Marine Environments* 3.2 (2006): 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.
7. Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Dobrovolskaia. "Simulation of marine ferry routes based on graph theory in the context of strategic planning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 782–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-782-793.
8. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. Web. 22 Feb. 2024 <<https://cruisemarketwatch.com/growth/>>.
9. Cruise Industry News. Web. 22 Feb. 2024 <<https://www.cruiseindustrynewswire.com/>>.
10. Maiorov, N. N., and V. A. Fetisov. "Stages of evolution of the relationship between the city and the sea passenger port on the example of St. Petersburg." *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya. Materialy XIX Mezh-dunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol. 1. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2020. 279–285.
11. Majorov, Nikolaj N. "Forecasting of the evolution of sea passenger terminals and network of ferry lines in the region of the Baltic sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.
12. Krile, Srećko, Nikolai Maiorov, and Vladimir Fetisov. "Modernization of the infrastructure of marine passenger port based on synthesis of the structure and forecasting development." *Sustainability* 13.7 (2021): 3869. DOI: 10.3390/su13073869.
13. Krile, Srećko, and Nikolai Maiorov. "The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals." *Transport Problems* 15 (2020): 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020–060.
14. Passenger Port of Saint-Petersburg, Marine Façade. Web. 15 Feb. 2024 <<https://www.portspb.ru>>.
15. AnyLogic. Web. 01 Feb. 2024 <<https://www.anylogic.ru>>.
16. Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Dobrovolskaia. "Stochastic model for forecasting of cruise or ferry ship arrival at seaport for infrastructure assessment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 169–180. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-169-180.
17. Chládek, Petr, Dana Smetanová, and Srećko Krile. "On some aspects of graph theory for optimal transport among marine ports." *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 101 (2018): 37–45. DOI: 10.20858/sjsutst.2018.101.4.
18. Fernández-Gámez, M. A., L. Valcarce-Ruiz, R. Becerra-Vicario, and J. Diéguez-Soto. "A dynamic modelling approach to manage the cruise port of call." *Research in Transportation Business & Management* 43 (2022): 100818. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100818.
19. Katalevskii, D. Yu. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii*. M.: Izdatel'skii dom «Delo» RANKhiGS, 2015.
20. Yazvenko, Maksim Romanovich, and Andrey Georgievich Morozkov. "Simulation of a sea cargo port as a queuing system in AnyLogic." *Sistemnyi analiz i logistika* 4(26) (2020): 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.
21. Tsamboulas, Dimitrios, Panayota Moraiti, and Giorgia Koulopoulou. "How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination." *Transportation research record* 2330.1 (2013): 24–30. DOI: 10.3141/2330-04.
22. Maiorov, Nikolai, Vladimir Fetisov, Srećko Krile, and Darijo Miskovic. "Simulation of the route network and ferry traffic intensity based on the process of discretization and circos plot intensity diagram." *Transport problems* 14.4 (2019): 21–30. DOI: 10.20858/tp.2019.14.4.2.
23. Circos. Web. 22 Feb. 2024 <<https://sourceforge.net/projects/jcicos/>>.
24. Krile, Srećko. "Efficient heuristic for non-linear transportation problem on the route with multiple ports." *Polish Maritime Research* 20.4 (2013): 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.

25. Optimizatsionnyj eksperiment v AnyLogic. Web. 1 March 2024 <<https://anylogic.help/ru/anylogic/experiments/optimization-experiment.html>>.

26. Voevodskii, E.N., and M. Ya. Postan. *Stokhasticheskie modeli v proektirovanii i upravlenii deyatel'nost'yu portov*. M.: Transport, 1987.

27. Maiorov N. N., A. A. Dobrovolskaia, and V. E. Taratun. "Research of ways to develop accurate digital models for objects and nodes of transport infrastructure." *Sistemnyi analiz i logistika* 4(30) (2021): 114–121. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-114-121.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —

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

Фетисов Владимир Андреевич —

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

Силина Ангелина Александровна — ассистент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: angd999@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maiorov, Nikolai N. —

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

Fetisov, Vladimir A. —

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

Silina, Angelina A. — Assistant
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: angd999@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 10 марта 2024 г.
Received: March 10, 2024.*

METHOD FOR SOLVING THE ISOSTAGE EQUATIONS**A. S. Vas'kov¹, A. A. Mironenko²**¹ — Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Russian Federation² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The method for obtaining the vessel fixed position from redundant measurements of one of the main navigation parameters that is distance which is traditionally used in navigation practice in coastal navigation is being under the present research. A new approach to solving the isostages equations based on measured distances to the corresponding pairs of landmarks is reduced to solving equations of straight lines obtained from the intersection points of the corresponding pairs of isolines. These lines are similar to the position lines built along the chords. In contrast to the classical method for the position lines the proposed chord lines directly converge at the fixed position which is obtained from the isolines. The proposed method eliminates the methodological error from replacing the isolines with the position lines and the need for additional iterations. The traditional navigation methods (the theory of isolines, the generalized method for position lines, the least square method) are facilitated as a mathematical framework. The solutions of the original redundant equations for position lines along chords using the least squares method are proposed. Hence, the hypothesis of random errors in measurements and reduced versions of the chords position lines for compensating the systematic errors and assessment of the vessel fixed position by the radial error is advanced. The expressions for estimating systematic errors in measurements for the purpose of their further compensation are given. 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 formalization of the proposed methods in the automatic navigation 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 by the pair of landmarks in coastal and congested waters on a new level.

Keywords: navigation parameter, distance arc, position line, least squares method, chord method, vessel fix position, radial error.

For citation:

Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "Method for solving the isostage equations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 212–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-212-223.

УДК 656.61.052.4**МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИЗОСТАДИЙ****А. С. Васьков¹, А. А. Мироненко²**¹ — ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова», Новороссийск, Российская Федерация² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследован метод получения координат обсервованного места судна по избыточным измерениям одного из основных навигационных параметров — дистанции, традиционно используемого в практике судовождения в условиях прибрежного плавания. Новая особенность решения уравнений изолиний — изостадий по измеренным дистанциям до соответствующих пар ориентиров — сводится к решению уравнений прямых, получаемых по точкам пересечения соответствующих пар изолиний. Эти линии аналогичны линиям положения, построенным по хордам. В отличие от классического обобщенного метода касательных линий положения, предлагаемые линии — хорды непосредственно сходятся в точке обсервованного

места судна, получаемой по изолиниям. Предлагаемый метод позволяет исключить методическую погрешность от замены изолиний касательными линиями положения и необходимость дополнительных итераций. В качестве математического аппарата применяются классические методы навигации: теория изолиний, обобщенный метод линий положения, метод наименьших квадратов. Приведены решения исходных избыточных уравнений линий положения по хордам методом наименьших квадратов при гипотезе действия случайных погрешностей измерений и редуцированных вариантов уравнений линий положения — хорд для компенсации систематических погрешностей с оценкой точности наблюдаемого места судна радиальной погрешностью. Предложены выражения для оценки систематических погрешностей в измерениях в целях их дальнейшей компенсации. Основные положения исследования подкреплены инфографикой. Приведенные выражения доведены до уровня непосредственного практического применения в целях разработки программного обеспечения систем навигации. Формализация предлагаемых методов в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту судна и управляющему им дистанционно решать задачи обработки соответствующей навигационной информации пар ориентиров в прибрежных и стесненных районах плавания на качественно новом уровне.

Ключевые слова: навигационный параметр, изостадия, линия положения, метод наименьших квадратов, метод хорд, наблюдаемое место судна, радиальная погрешность.

Для цитирования:

Васьков А. С. Метод решения уравнений изостадий / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 212–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-212-223.

Введение (Introduction)

В исследованиях [1]–[3] выполнен детальный анализ контроля безопасности движения судна по программной траектории (ПТ) в стесненных водах изолиниями измеряемых навигационных параметров (НП) пеленгов и дистанций до ориентиров. Характерные навигационные ориентиры могут выбираться вручную или с помощью специально разработанных программных приложений (например, в современных *ECDIS*). Непрерывные измерения НП навигационных ориентиров могут осуществляться автоматически с помощью РЛС–САРП [1], [4], при этом пары характерно расположенных ориентиров обеспечивают однозначную и надежную их идентификацию [3], [5]–[8].

Для определения координат наблюдаемого места судна (ОМС) необходимо как минимум измерение двух НП. В случае графического решения задача сводится к непосредственному построению изолиний на морской навигационной карте, когда точка пересечения изолиний является искомым ОМС (рис. 1, точка 7). В исследовании [9] рассмотрен вариант решения уравнений изолиний на сфере. Универсальной и фундаментальной основой аналитического решения является обобщенный метод линий положения (ЛП) В. В. Каврайского [10], который заключается в переходе от нелинейных уравнений изолиний НП к ЛП — прямым линиям [2], [3], [5], [7], [11]–[15], т. е. *линеаризации изолиний*. В результате ОМС по изолиниям не совпадает с ОМС по ЛП в силу методической погрешности при замене изолиний ЛП. Для практических целей она опускается, а при необходимости компенсируется применением метода последовательных приближений (нескольких итераций) [2] (см. рис. 1, точки 7 и 8).

При избыточном количестве измерений, для получения координат ОМС, дополнительно решаются задачи уменьшения воздействия случайных и компенсация систематических погрешностей измерений НП [3], [5], [7], [11]–[17]. Избыточно измеренные НП также позволяют минимизировать ошибки оценки навигационной ситуации, дают пространственное понимание положения и движения судна относительно навигационных опасностей.

В практическом судовождении процесс измерения НП (пеленгов и дистанций) с помощью автономных судовых средств навигации (РЛС–САРП) служит важным аспектом для перспективных морских автономных надводных судов (МАНС) в стесненных условиях плавания [1]–[3], т. е. на малых дистанциях до ориентиров.

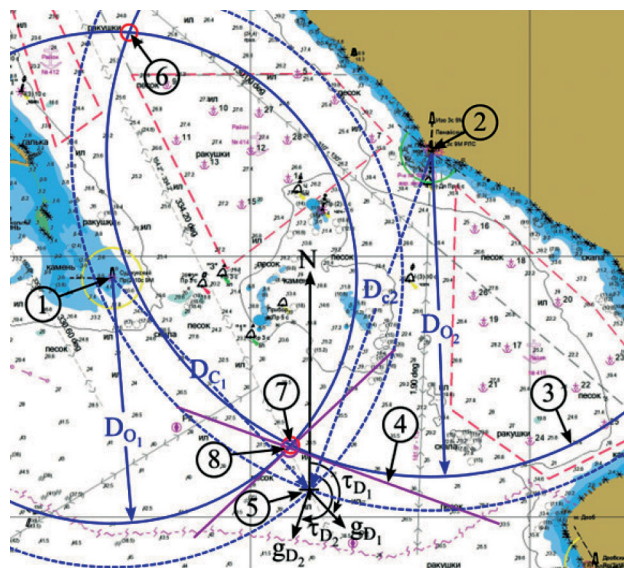


Рис. 1. Демонстрация ОМС по изолиниям и ЛП двух дистанций:

- 1, 2 — навигационные ориентиры; 3 — изолиния дистанции (изостадия); 4 — ЛП;
5 — счислимое место судна; 6 — вторая точка пересечения изолиний; 7 — ОМС по двум изолиниям;
8 — ОМС по двум ЛП; D_{cl} , D_{ol} — соответственно счислимые и наблюдаемые значения дистанций
до ориентиров; t_{D1} , t_{D2} , g_{D1} , g_{D2} — направления и модули градиентов НП

Fig. 1. Demonstration of the vessel fixed position using isolines and position lines of two distances:

- 1, 2 — navigational landmarks; 3 — isoline of distance (isostage); 4 — position line;
5 — dead-reckoning position of vessel; 6 — second point of isolines intersection;
7 — vessel fixed position along two isolines; 8 — vessel fixed position along two position lines;
 D_{cl} , D_{ol} — dead-reckoning values and fixed values of distances to landmarks respectively;
 t_{D1} , t_{D2} , g_{D1} , g_{D2} — directions and modules of navigation parameters gradients

Основной целью настоящего исследования является идея непосредственного аналитического расчета ОМС по изолиниям без использования обобщенного метода ЛП при избыточном количестве основных, традиционно измеряемых НП в судовождении, что позволит исключить методическую погрешность и необходимость итерационной процедуры пересчета для уточнения ОМС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Измеренные НП: пеленги и дистанции, их комбинации до пары навигационных ориентиров, обеспечивают однозначную их идентификацию [3] и кроме того, дают семь изолиний: окружность (две изостадии по дистанциям и горизонтальному углу; разности двух пеленгов (изогонна)); два изопеленга (по пеленгам); софокусные гипербола (по разностям дистанций) и эллипс (по сумме дистанций) — рис. 2.

На основе классической теории определения координат ОМС, а также исследований авторов [2], [3], [5], [7], [10]–[17] уравнения и свойства изолиний в системе прямоугольных координат, связанных с центром базы пары ориентиров или смещенным центром (при необходимости), можно представить в следующем виде.

1. Изолинии окружностей для НП — дистанций и горизонтального угла:

$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 = R^2; \quad (1)$$

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

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

где $x_i, y_i, x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}, R$ — прямоугольные координаты ориентиров, смещения центра и радиус окружности (изолинии, мили);

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

Π_A, Π_B, γ — соответственно пеленги на ориентиры, горизонтальный угол между ориентирами, °;

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

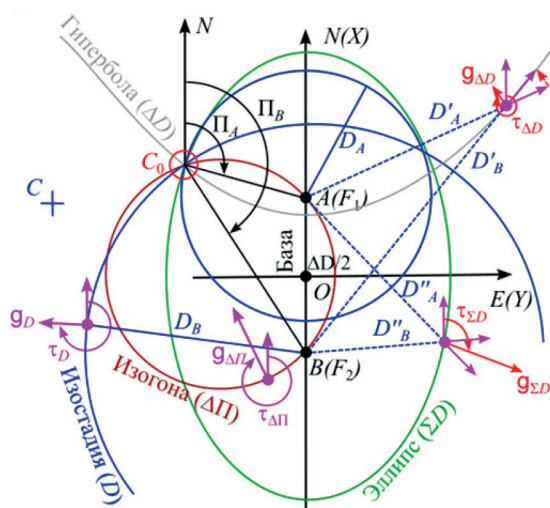


Рис. 2. Изолинии НП пары ориентиров при гипотезе отсутствия (или малости) систематических и случайных погрешностей в измерениях:

XOY — прямоугольная система координат, связанная с базой ориентиров;

N, E — направления на север и восток; C, C_0 — счислимое и наблюдаемое место судна;

$A(F_1), B(F_2)$ — ориентиры (софокусы гиперболы и эллипса);

Π_A, Π_B — пеленги на ориентиры; D_A, D_B — дистанции до ориентиров;

$\Delta D, \Sigma D$ — разность и сумма дистанций до ориентиров; τ_D, g_D — направление и модуль градиентов дистанций; $\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}, \tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$ — направление и модуль градиента разности и суммы дистанций

Fig. 2. Isolines of navigation parameters of a pair of landmarks under the hypothesis of the absence (or smallness) of systematic and random errors in measurements:

XOY — rectangular coordinate system associated with a landmarks base; N, E — directions north and east;

C, C_0 — dead-reckoning position and fixed position of the ship;

$A(F_1), B(F_2)$ — landmarks (co-foci of hyperbola and ellipse); Π_A, Π_B — bearings to landmarks;

D_A, D_B — distances to landmarks; $\Delta D, \Sigma D$ — difference and sum of distances to landmarks;

τ_D, g_D — direction and module of distance gradients;

$\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}, \tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$ — direction and module of the gradient of the distances difference and sum

2. Изолинии (изопеленги для НП — прямого пеленга на малых дистанциях) — в виде уравнения прямой с угловым коэффициентом $\Pi_i = (\Pi_A, \Pi_B) = \text{const}$:

$$y_i - y_c = (x_i - x_c) \operatorname{tg} \Pi_{i(A,B)}; g_{n(A,B)} = \frac{57,7^\circ}{D_{A,B}}, \text{ } ^\circ/\text{мили}; \tau_{n(A,B)} = \Pi_i - 90^\circ, \quad (4)$$

где $\tau_{n(A,B)}, g_{n(A,B)}$ — направления и модули градиентов пеленгов, °, °/мили;

x_c, y_c — прямоугольные координаты счислимого места судна (СМС), мили.

3. Изолинии — гиперболы для НП — разности дистанций:

$$\frac{(x - x_{\text{ц}})^2}{a^2} - \frac{(y - y_{\text{ц}})^2}{b^2} = 1; \quad (5)$$

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

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

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

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

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

4. Изолинии — эллипса для НП — суммы дистанций:

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

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

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

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

Совместное решение разнородных нелинейных уравнений изолиний (1)–(8) требует применения различных методов решения [18], что представляет значительные сложности, поэтому весьма целесообразной является разработка специальных методологических обобщенных подходов их решения, один из которых рассмотрен в данном исследовании.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Предлагается заявленную идею аналитического определения координат ОМС обобщенным методом изолиний рассмотреть при измерении НП-дистанций с последующим обобщением на другие НП. Для этого необходимо решить систему нелинейных уравнений изолиний окружностей вида (1). В результате получается две точки ОМС, т. е. *многозначность* (см. рис. 1), которая в практике судовождения устраняется при соблюдении одного из следующих дополнительных условий: известном СМС или нахождении одной из точек ОМС на берегу либо выполнении измерения дополнительного НП, т. е. решении системы трех уравнений изолиний (рис. 3). За центр системы координат можно принять любую точку в районе плавания, однако с учетом традиций судовождения целесообразно использовать полученную по счислению (x_o, y_o) .

Решение уравнений изолиний (1) предлагается искать через уравнения прямых линий, проходящих через точки пересечения двух изолиний (изостадий) — окружностей с центрами в позиции навигационных ориентиров (x_i, y_i) , причем одна из них является искомым ОМС (x_o, y_o) . Эти прямые линии будут перпендикулярны соответствующим базовым линиям между ориентирами по условиям их построения (см. рис. 3 позиции 8, 9) и, следовательно, заменяют отрезок изолинии по методу хорд (вместо касательных ЛП). В отличие от ЛП по методу касательных, прямые — хорды пересекаются именно в точке ОМС (x_o, y_o) по изолиниям, т. е. исключается методическая погрешность от замены изолиний касательными ЛП. Уравнения прямых — хорд можно получить после выполнения следующих преобразований:

$$\left. \begin{aligned} ((x_o - x_c) - (x_1 - x_c))^2 + ((y_o - y_c) - (y_1 - y_c))^2 &= D_1^2; \\ ((x_o - x_c) - (x_2 - x_c))^2 + ((y_o - y_c) - (y_2 - y_c))^2 &= D_2^2; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $x_o, y_o, x_c, y_c, x_i, y_i$ — координаты ОМС, СМС, ориентиров.

Очевидно, что для получения ОМС координатами СМС в уравнениях (9) можно пренебречь:

$$\left. \begin{aligned} (x_o - x_1)^2 + (y_o - y_1)^2 - D_1^2 &= 0; \\ (x_o - x_2)^2 + (y_o - y_2)^2 - D_2^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

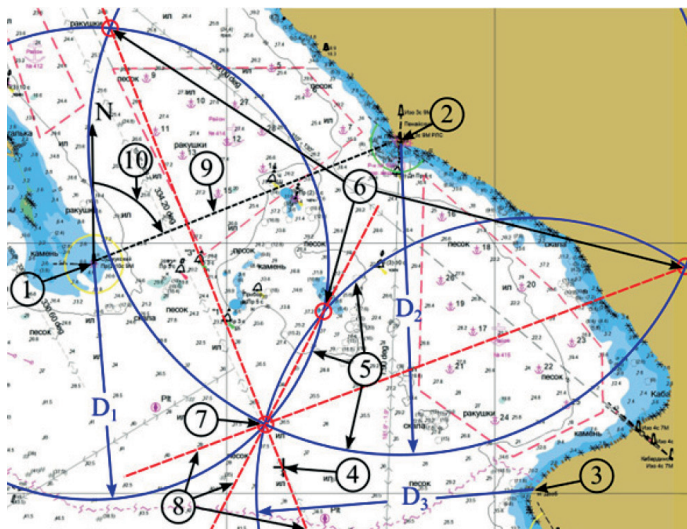


Рис. 3. ОМС по изолиниям трех дистанций:

- 1, 2, 3 — позиции навигационных ориентиров; 4 — СМС; 5 — изолинии дистанций (изостадий);
6 — точки пересечения изолиний, не являющиеся ОМС;
7 — ОМС по трем изолиниям (общая точка пересечения изолиний);
8 — линии, проходящие через обе (две) точки пересечения пар изолиний; 9 — база ориентиров 1 и 2;
10 — направление базы ориентиров 1 и 2; D_1, D_2, D_3 — измеренные НП-дистанции

Fig. 3. Ship fixed position along the isolines of three distances:

- 1, 2, 3 — positions of navigational landmarks; 4 — dead-reckoning position of vessel;
5 — isolines of distances (isostages); 6 — points of isolines intersection that are not fixed positions of vessels;
7 — fixed position of vessel along three isolines (common point of isolines intersection);
8 — lines passing through both (two) points of isolines pairs intersection; 9 — landmarks base of 1 and 2;
10 — direction of 1 and 2 landmarks base; D_1, D_2, D_3 — measured navigation parameters — distances

Приравнивание левых частей уравнений (10), раскрытие разностей квадратов, упрощение и группировка полученных составляющих дает уравнение искомой прямой линии — хорды, представленной в общем виде в индексах и в двух вариантах для любого сочетания пар возможных изолиний (см. рис. 3) — пар ориентиров:

$$2\Delta x_{ij}x_o + 2\Delta y_{ij}y_o = l_{ij}; l_{ij} = (x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2) + (D_i^2 - D_j^2); \quad (11)$$

$$\Delta x_{ij}x_o + \Delta y_{ij}y_o = l_{ij}; l_{ij} = \Delta x_{ij}x_{ijcp} + \Delta y_{ij}y_{ijcp} + \Delta D_{ij}D_{ijcp}; \quad (12)$$

$$\Delta x_{ij} = x_j - x_i; x_{ijcp} = 0,5(x_j + x_i); \Delta y_{ij} = y_j - y_i; y_{ijcp} = 0,5(y_i + y_j);$$

$$\Delta D_{ij} = D_j - D_i; D_{ijcp} = 0,5(D_j + D_i)$$

Следует отметить, что в одном случае коэффициенты уравнений (11) при искомым координатах ОМС зависят от соответствующих разностей координат ориентиров, а свободные члены — от суммы разностей квадратов координат ориентиров и дистанций до них. В другом случае, представленном в виде (12), свободные члены представляют произведения разностей координат ориентиров и дистанций, а также их средних значений.

Уравнение прямой (11) можно представить после преобразований с угловым коэффициентом [18], что следует из прямоугольных треугольников, связывающих координаты ориентиров и определяющих направление базы пары ориентиров (см. рис. 3 позиция 10), с учетом раскрытия разности квадратов дистанций в виде произведения разности и суммы дистанций (измеренных НП):

$$y_o + x_o \operatorname{ctg} \Pi_{ij} = l_{ij}; l_{ij} = x_{ijcp} \operatorname{ctg} \Pi_{ij} + y_{ijcp} + \frac{\Delta D_{ij} \sum D_{ij}}{2\Delta y_{ij}}, \quad (13)$$

где Π_{ij} — направления базовой линии между ориентирами;

x_{ijcp}, y_{ijcp} — средние значения координат пары ориентиров (центра базы).

Для устранения многозначности — пересечения двух изолиний, в частности дистанций, дающих две точки, предлагается систему (10) дополнить уравнением третьей изолинии НП:

$$\left. \begin{aligned} (x_o - x_1)^2 + (y_o - y_1)^2 - D_1^2 &= 0; \\ (x_o - x_2)^2 + (y_o - y_2)^2 - D_2^2 &= 0; \\ (x_o - x_3)^2 + (y_o - y_3)^2 - D_3^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Если отсутствуют систематические и случайные погрешности измерений при парных решениях уравнений системы (14) аналогично (10) и выводах (11) или (13), то получается одна (совместная) точка пересечения всех трех изолиний (координаты ОМС x_o, y_o), совпадающая с пересечением трех прямых линий — хорд (11) или (13), проходящих через обе точки пересечения соответствующих пар изолиний:

$$\left. \begin{aligned} 2\Delta x_{21}x_o + 2\Delta y_{21}y_o &= l_{21}; \\ 2\Delta x_{31}x_o + 2\Delta y_{31}y_o &= l_{31}; \\ 2\Delta x_{32}x_o + 2\Delta y_{32}y_o &= l_{32}; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} y_o + x_o \operatorname{ctg} \Pi_{21} &= l_{21}; \\ y_o + x_o \operatorname{ctg} \Pi_{31} &= l_{31}; \\ y_o + x_o \operatorname{ctg} \Pi_{32} &= l_{32}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Любую пару линейных уравнений систем (15), (16), эквивалентных решению нелинейных систем уравнений изолиний (10), (14), определяющих общую точку пересечения с координатами ОМС по изолиниям НП, можно решить различными методами: Крамера, матричным, Гаусса и др. Например, решение каждой возможной пары уравнений системы (16) можно представить в матричном виде, и координаты полученных трех ОМС будут совпадать (в идеальном случае без погрешностей измерений и вычислений):

$$A_{ij} X = L_{ij}; \quad X = A_{ij}^{-1} L_{ij}; \quad (17)$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \operatorname{ctg} \Pi_{ij} & 1 \\ \operatorname{ctg} \Pi_{ij} & 1 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix}; \quad L_{ij} = \begin{pmatrix} l_{ij} \\ l_{ij} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

При действии погрешностей измерений НП (дистанций) каждая линия (15) или (16) получит смещение и они в общем случае не пересекаются в одной точке, а образуют треугольник погрешностей с координатами, определенными по выражениям (17), (18). Радиальная погрешность ОМС (вершин треугольника погрешностей) по каждой паре изолиний дистанций (14) при одинаковых средних квадратических погрешностях (СКП) измерения дистанций будет соответствовать СКП линий (15), (16) по условиям их построения и определяется выражением [11]–[15]:

$$M_{ij} = \frac{1}{\sin \theta_{ij}} \sqrt{\left(\frac{m_D}{g_D}\right)^2 + \left(\frac{m_D}{g_D}\right)^2} = \frac{m_D}{\sin \theta_{ij}} \sqrt{2}; \quad \theta_{ij} = \Pi_i - \Pi_j, \quad (19)$$

где M_{ij} — радиальная погрешность ОМС (каждой вершины треугольника погрешностей);

$\theta_{ij}, \Pi_i, \Pi_j$ — угол пересечения соответствующих изолиний и пеленги на ориентиры;

m_D, g_D — СКП измерения дистанций и модуль градиента дистанции (2).

Применение метода наименьших квадратов (МНК) в несовместной системе трех уравнений, например, (15), дает систему двух нормальных уравнений искомых вероятнейших координат ОМС, в которых компенсируются влияние случайных погрешностей измерений, а ре-

шение в векторно-матричной форме для любого количества уравнений (11) имеет следующий вид [11]–[15]:

$$PA X = PL; X = (A^T P A)^{-1} A^T P^{-1} L; \quad (20)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix}; A^T = \begin{bmatrix} 2\Delta x_{21} & 2\Delta x_{31} & \dots & 2\Delta x_{ij} \\ 2\Delta y_{21} & 2\Delta y_{31} & \dots & 2\Delta y_{ij} \end{bmatrix}; p_{ij} = 1 / M_{ij}^2;$$

$$A = \begin{bmatrix} 2\Delta x_{21} & 2\Delta y_{21} \\ 2\Delta x_{31} & 2\Delta y_{31} \\ \dots & \dots \\ 2\Delta x_{ij} & 2\Delta y_{ij} \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} l_{21} \\ l_{31} \\ \dots \\ l_{ij} \end{bmatrix}; P = \begin{bmatrix} p_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{ij} \end{bmatrix},$$

где X — матрица-столбец искоемых вероятнейших координат ОМС;

A, A^T — исходная и транспонированная матрицы коэффициентов уравнений (15);

p_{ij} — веса ОМС по двум изолиниям (вершин фигуры погрешностей);

L — матрица-столбец правых частей уравнений (15);

P, P^{-1} — прямая и обратная матрицы весов уравнений прямых линий (15).

При совместном действии случайных и систематических погрешностей коэффициенты уравнений ЛП (11) редуцируются их средними значениями по принципу применения классических редуцированных уравнений ЛП [3], [13], [15] перед применением МНК. Тогда уравнения (20) с редуцированными коэффициентами могут использоваться при любых типах погрешностей. Элементы векторно-матричных уравнений (20) при совместном действии случайных и систематических погрешностей с редуцированными коэффициентами примут следующий вид:

$$A^T = \begin{bmatrix} \left(2\Delta x_{21} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} \right) & \left(2\Delta x_{31} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} \right) & \dots & \left(2\Delta x_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} \right) \\ \left(2\Delta y_{21} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} \right) & \left(2\Delta y_{31} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} \right) & \dots & \left(2\Delta y_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} \right) \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(2\Delta x_{21} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} \right) & \left(2\Delta y_{21} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} \right) \\ \left(2\Delta x_{31} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} \right) & \left(2\Delta y_{31} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} \right) \\ \dots & \dots \\ \left(2\Delta x_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} \right) & \left(2\Delta y_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} \right) \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} l_{21} - \frac{\sum_{ij=1}^n l_{ij}}{n} \\ l_{31} - \frac{\sum_{ij=1}^n l_{ij}}{n} \\ \dots \\ l_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n l_{ij}}{n} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Ввиду суперпозиции сумм можно показать, что в каждом слагаемом уравнений (11), (12) будет компенсироваться своя систематическая составляющая погрешностей:

$$l_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n l_{ij}}{n} = (x_i^2 - x_j^2) - \frac{(x_i^2 - x_j^2)}{n} + (y_i^2 - y_j^2) - \frac{\sum_{ij=1}^n (y_i^2 - y_j^2)}{n} + (D_i^2 - D_j^2) - \frac{\sum_{ij=1}^n (D_i^2 - D_j^2)}{n};$$

$$l_{ij} - \frac{\sum_{ij=1}^n l_{ij}}{n} = \Delta x_{ij} x_{ijcp} - \frac{\sum_{ij=1}^n \Delta x_{ij} x_{ijcp}}{n} + \Delta y_{ij} y_{ijcp} - \frac{\sum_{ij=1}^n \Delta y_{ij} y_{ijcp}}{n} + \Delta D_{ij} D_{ijcp} - \frac{\sum_{ij=1}^n \Delta D_{ij} D_{ijcp}}{n}.$$

Тогда для уравнения (15) после ОМС суммарная систематическая погрешность находится следующим образом:

$$x_o \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta x_{ij}}{n} + y_o \frac{\sum_{ij=1}^n 2\Delta y_{ij}}{n} - \frac{\sum_{ij=1}^n l_{ij}}{n} = \Delta_{ст}, \quad (22)$$

где $\Delta_{ст}$ — систематическая погрешность в измерении НП (дистанций).

Действие систематических погрешностей иначе оценивается из векторного треугольника градиентов НП (дистанций), т. е. через градиенты суммы дистанций (8) [17]. В результате смещение искомой линии (12) на рис. 4 при действии систематических погрешностей находится как проекция градиента суммы дистанций с учетом его направления (8) на направление линии (12) следующим выражением:

$$\Delta_{ij} = \Delta_{ст} g_{D_{ij}} \cos(\tau_{D_{ij}} - \Pi_{ij} \pm 90^\circ) = \Delta_{ст} g_{D_{ij}} \sin(\Pi_{ср\ ij} - \Pi_{ij}), \quad (23)$$

где Δ_{ij} — смещение искомой линии (12) из-за систематической погрешности в каждом уравнении;

$\Pi_{ср\ ij} - \Pi_{ij}$ — острый угол (позиция 4 на рис. 4) между направлением базы и средним пеленгом с позиции судна на ориентиры, образующими соответствующую базу.

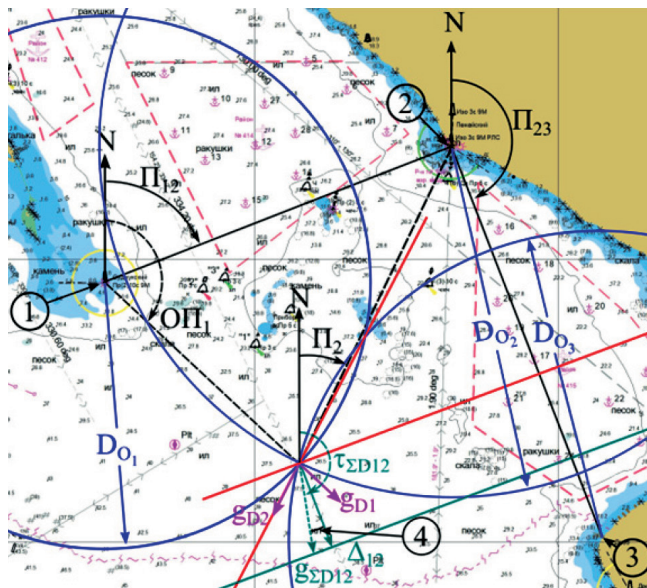


Рис. 4. Действие систематической погрешности при ОМС по изолиниям трех дистанций:

1, 2, 3 — навигационные ориентиры;

4 — острый угол между направлением градиента δ и направлением искомой линии 12, перпендикулярной базе $O\Pi_{12}$

Fig. 4. The effect of systematic error in the ship fixed position along isolines of three distances:

1, 2, 3 — navigational landmarks; 4 — acute angle between gradient direction δ

and the direction of the desired line 12, perpendicular to the base $O\Pi_{12}$

Следовательно, наличие систематических погрешностей в измерениях НП обуславливает необходимость дополнения системы линейных уравнений вида (15) еще одним уравнением для ее определения и компенсации. При совместном действии случайных и систематических погрешностей необходимо выполнить уравнивание измерений с учетом их весов (20), а именно:

$$\left. \begin{aligned} p_{21}x_o \operatorname{ctg} \Pi_{21} + p_{21}y_o + p_{21}\Delta_{21} &= p_{21}l_{21} + \delta_{21}p_{21}; \\ p_{31}x_o \operatorname{ctg} \Pi_{31} + p_{31}y_o + p_{31}\Delta_{31} &= p_{31}l_{31} + \delta_{31}p_{31}; \\ p_{23}x_o \operatorname{ctg} \Pi_{23} + p_{23}y_o + p_{23}\Delta_{23} &= p_{23}l_{23} + \delta_{32}p_{23}, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где δ_{ij} — случайные погрешности измерений.

В данном случае согласованное решение системы (24) при минимуме случайных погрешностей сводится к общепринятому решению системы линейных уравнений МНК, определяющих координаты ОМС (x_o, y_o) и систематическую погрешность (Δ_{ij}) прямых линий — хорд (11):

$$X = (A^T P^{-1} A)^{-1} A^T P^{-1} L; \quad X = \begin{bmatrix} x_o & y_o & \Delta_{ij} \end{bmatrix}^T. \quad (25)$$

Таким образом, полученные матричные линейные уравнения (20), (24) представляют результат более простого и универсального аналога решения сложных нелинейных уравнений изолиний (1).

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Измерение избыточного количества навигационных параметров нескольких пар ориентиров для определения координат ОМС позволяет однозначно опознавать ориентиры по характерному направлению их базы и дистанции между ними в отличие от использования единственного ориентира. Кроме того, реализация предлагаемого метода в современных технических средствах, в частности *ECDIS*, позволяет получать координаты ОМС по изолиниям НП (дистанциям) без методической погрешности, присущей обобщенному методу линий положения. Данный аспект важен в целях повышения безопасности традиционного и перспективного автономного судовождения в стесненных водах.

2. В перспективе подлежат изучению как проблема наилучшего выбора взаимного расположения пар навигационных ориентиров из возможных вариантов с целью обобщения предлагаемого метода под различные типы навигационных изолиний, так и их комбинаций для повышения точности ОМС, использования различных изолиний НП в качестве ведущих, контрольных и ограждающих в соответствии с конкретным участком ПТ и навигационных условий плавания судна.

3. Актуальным является дальнейшее исследование одновременного использования избыточного количества пар ориентиров для процесса автоматического измерения и сопровождения только пеленгов и дистанций. При этом количество изолиний для определения координат ОМС увеличивается в разы, что обеспечивает наилучшее расположение изолиний (ЛП) относительно опасностей и ПТ соответственно для оперативного контроля движения судна, а также способствует повышению точности и надежности ОМС, безопасности плавания при традиционном и автономном судовождении в стесненных водах.

4. Подлежит дальнейшему изучению проработка концепции планирования и контроля ПТ движения судна в условиях прибрежного плавания в параметрической форме кривыми второго порядка, а именно изолиниями основных навигационных параметров (пеленга, дистанции, их комбинации) как альтернативы координатного принципа ГНСС.

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. 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.

4. 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.

5. Баранов Ю. К. Навигация / Ю. К. Баранов, М. И. Гаврюк, В. А. Логиновский, Ю. А. Песков. — СПб.: Лань, 1997. — 512 с.

6. Песков Ю. А. Руководство по «Организации мостика» для судов / Ю. А. Песков. — Новороссийск: НГМА, 2002. — Т. 1. — 146 с.

7. Практическое кораблевождение: для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Кн. 1 / Под ред. А. П. Михайловского. — СПб.: ГУНиО, 1889. — 896 с.

8. Swift A. I. Bridge team management. A Practical Guide / A. I. Swift. — Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004. — 118 p.

9. 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.

10. Каврайский В. В. Избранные труды / В. В. Каврайский. — М.: Изд. УНГС ВМФ, 1956. — Т. 1: Астрономия и геодезия. — 358 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. Кожухов В. П. Математические основы судовождения / В. П. Кожухов, А. М. Жухлин, В. Т. Кондрашихин, В. А. Логиновский, А. Н. Лукин. — М.: Транспорт, 1993. — 200 с.

13. Васьков А. С. Математические основы судовождения / А. С. Васьков, А. А. Мироненко. — СПб.: Лань, 2023. — 244 с.

14. Груздев Н. М. Оценка точности морского судовождения / Н. М. Груздев. — М.: Транспорт, 1989. — 191 с.

15. Родионов А. И. Автоматизация судовождения / А. И. Родионов, А. Е. Сазонов. — М.: Транспорт, 1992. — 192 с.

16. 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.

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

18. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1984. — 832 с.

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 admiral 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 admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

3. 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 admiral S. O. Makarova* 15.6 (2023): 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950.

4. 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.
5. Baranov. Yu. K., M. I. Gavryuk, V. A. Loginovskii, and Yu. A. Peskov. *Navigatsiya*. SPb.: Lan', 1997.
6. Peskov, Yu. A. *Rukovodstvo po «Organizatsii mostika» dlya sudov*. Vol. 1. Novorossiisk: NGMA, 2002.
7. Mikhailovskii, A.P., ed. *Prakticheskoe korablevozhdenie: dlya komandirov korablei, shturmanov i vakhtennykh ofitserov. Kniga pervaya*. SPb.: GUN i O, 1889.
8. Swift, A. I. *Bridge team management. A Practical Guide*. Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004.
9. 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.
10. Kavraiskii, V. V. *Izbrannye trudy*. Vol. 1. M.: Izd. UNGS VMF, 1956.
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. Kozhukhov, V. P., A. M. Zhukhlin, V. T. Kondrashikhin, V. A. Loginovskii, and A. N. Lukin. *Matematicheskie osnovy sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1993.
13. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. *Matematicheskie osnovy sudovozhdeniya*. SPb.: Lan', 2023.
14. Gruzdev, N. M. *Otsenka tochnosti morskogo sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1989.
15. Rodionov, A. I., and A. E. Sazonov. *Avtomatizatsiya sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1992.
16. 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.
17. *Morekhodnye tablitsy (MT-2000). № 9011*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002.
18. Korn, Granino A., and Theresa M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. Dover Publications, 2000.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васьков Анатолий Семёнович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353922, 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, 353918,
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 15 января 2024 г.
Received: January 15, 2024.

**TEMPLATES OF SHIP MOVEMENT ANTHROPOMORPHIC CONTROL:
DESIGN AND APPLICATION****V. O. Tyrva, E. V. Bova, A. Y. Rumyantsev**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The process of designing templates of anthropomorphic ship movement control is described in the paper. The solutions of the sequence of modeling problems are used in the state space of the ergatic “skipper-ship” system for the example of a ship of “Volga-Don” type. Parametric interval uncertainties are taken into account in the initial mathematical model of the controlled object. They influence the unambiguity of solving the optimal control problem in the classical formulation. Factors of a priori uncertainty are the draft of the ship and the depth of the ship’s passage. Numerical solutions to the problem of optimal ship movement control in terms of speed are obtained for intervals ends of the mathematical model parameters values. The solutions are used in the design of templates to describe and account for the uncertainty of the allocation of management resources according to the methodology of interaction planning in an ergatic system. The templates of anthropomorphic control in the skipper-ship system are represented by sequences of element numbers of a set of normal systems of ordinary differential equations. They are constructed in a five-dimensional space of states according to a transformed mathematical model of the ship. Each normal system of ordinary differential equations displays in mathematical form an incomplete representation of the action of virtual controls and the corresponding elementary motion of the ship due to the existence of uncertainties. The procedures for constructing various options for the allocation of anthropomorphic control resources and corresponding templates of anthropomorphic control according to expert estimates based on a variety of solutions to the optimal control problem are proposed. The constructive property of the templates of anthropomorphic control is illustrated by the specific examples. New templates can be built by joining standard templates in a certain sequence, and the standard templates themselves can be determined using information about the performed movements of the ship controls, taking into account the experience of navigation. It is shown that it is possible to use such a posteriori information to train the automatic control machine of the “skipper-ship” system by rational management methods, including those that cannot be obtained as solutions to mathematical problems of optimal control. The library of anthropomorphic control templates is presented as an integral part of the knowledge base when using the technology of expert systems in the construction of automatic control machine with artificial intelligence.

Keywords: template, control, uncertainty, ergatic system, automatic control machine, ship, modeling, elementary movement, state space.

For citation:

Tyrva, Vladimir O., Elena V. Bova, and Alexey Yu. Rumyantsev. “Templates of ship movement anthropomorphic control: design and application.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 224–235. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-224-235.

УДК 62–50**ШАБЛОНЫ АНТРОПОМОРФНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА:
КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ****В. О. Тырва, Е. В. Бова, А. Ю. Румянцев**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В данной работе процесс конструирования шаблонов антропоморфного управления движением судна представлен решениями последовательности задач моделирования в пространстве состояний эргатической системы «судоводитель – судно» на примере судна типа Волго-Дон. В исходной математической модели управляемого объекта учтены параметрические интервальные неопределенности, влияющие на однозначность решения задачи оптимального управления в классической постановке. Факторами

априорной неопределенности являются осадка судна и глубина судового хода. Численные решения задачи оптимального по быстродействию управления перемещением судна получены для концов интервалов значений параметров математической модели. Полученные решения использованы при конструировании шаблонов для описания и учета неопределенности распределения ресурсов управления по методологии планирования взаимодействия в эргатической системе. Шаблоны антропоморфного управления в системе «судоводитель – судно» представлены последовательностями номеров элементов множества нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, построенных в пятимерном пространстве состояний по преобразованной математической модели судна. Каждая нормальная система обыкновенных дифференциальных уравнений отображает в математической форме неполное, из-за существования неопределенностей, представление о действии виртуальных органов управления и соответствующем элементарном движении судна. Предложены процедуры построения различных вариантов распределения ресурсов антропоморфного управления и его соответствующих шаблонов, составленных по экспертным оценкам, на основе множества решений задачи оптимального управления. На конкретных примерах проиллюстрировано конструктивное свойство шаблонов антропоморфного управления: новые шаблоны могут быть построены с помощью стыковки в определенной последовательности типовых аналогов, а типовые шаблоны определены с применением сведений о выполненных движениях органов управления судном с учетом опыта судовождения. Тем самым показана возможность использования таких апостериорных сведений для управления эргатической системой «судоводитель – судно» рациональными способами, в том числе такими, которые не могут быть получены с помощью решения математических задач оптимального управления. Библиотека шаблонов антропоморфного управления представлена как составная часть базы знаний при использовании технологии экспертных систем в построении управляющего автомата с искусственным интеллектом.

Ключевые слова: шаблон, управление, неопределенность, эргатическая система, управляющий автомат, судно, моделирование, элементарное движение, пространство состояний.

Для цитирования:

Тырва В. О. Шаблоны антропоморфного управления движением судна: конструирование и применение / В. О. Тырва, Е. В. Бова, А. Ю. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 224–235. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-224-235.

Введение (Introduction)

В рассматриваемой эргатической системе управления движением судна — «человек – машина» (СЧМ) — функции управления реализуют совместно и параллельно во времени человек-оператор (ЧО) и управляющий автомат (УА). Основная особенность совместного управления движением судна объектом СЧМ заключается в том, что УА системы вырабатывает управляющие воздействия, подобные тем, которые совершает ЧО (судоводитель), воздействуя мускульным усилием на орган управления человеко-машинного интерфейса [1]. Такое управление, представляемое как *антропоморфное управление* (АУ) [2], моделируется последовательностью сигналов дискретного управления (СДУ), приводящих к смене элементарных движений объекта СЧМ [3]. Показано, что для целеуказания и планирования АУ могут быть использованы шаблоны, имеющие удобные для восприятия ЧО (судоводителем) формы представления в виде графиков и последовательностей неполных представлений элементарных движений, а также простой вербальной интерпретации с помощью структурированной системы целей [4]–[6].

Ставится и решается задача иллюстрации предлагаемой методики конструирования шаблонов АУ для уровня целеуказания на базе расчетов программ оптимального управления движением судна типа Волго-Дон. Использование теории оптимального управления [7] совместно с технологией обработки знаний в расчете на применение экспертной системы искусственного интеллекта [8] представляется целесообразным при решении этой задачи, так как судно принадлежит к числу технических объектов, для которых разработаны приемлемые для описания управляемых движений математические модели и накоплен обширный опыт судовождения. В частности, модель в форме нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, приведенная в [9], может быть использована непосредственно для постановки и решения задач оптимального управления по методу принципа максимума Л. С. Понтрягина [7].

Решение задачи оптимального управления называют *программой* [10], а ее получение — *планированием* [11]. При планировании используется «гипотеза полной определенности» [10], согласно которой не принимаются во внимание неточности, вызванные отсутствием полной адекватности математических описаний реальным процессам. При построении АУ оптимальное управление «помещается» в класс ситуационных управлений [12] в его развитии для подвижных объектов [13]. Классическая математическая модель динамики судна преобразуется в множество неполных представлений элементарных движений, которые в расширенном пространстве состояний учитывают как текущее положение судна в системе фазовых координат, так и перемещения органов управления при реализации АУ в соответствии с полной системой целей [6]. Построение шаблонов АУ основано на использовании неопределенностей, связанных с неполнотой сведений об элементарных движениях управляемого объекта в пространстве состояний СЧМ и распределении ресурсов управления для реализации программного движения, удовлетворяющего выработанным целям АУ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для описания управляемого движения судна используем *метод пространства состояний*. Из уравнений плоского движения судна [9] выделим уравнения продольного движения судна в трехмерном пространстве состояний. Для рассматриваемого случая запишем уравнения продольного движения судна в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= a_1 x_2^2(t) + (a_2 x_2(t) + a_3)u(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $x_1(t)$, $x_2(t)$ — координаты местоположения и скорости судна (фазовые координаты) в пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2\}$, зависящие от времени t (точки над обозначением координат x_1 и x_2 означает применение к ней операции дифференцирования по времени);

a_1 , a_2 , a_3 — коэффициенты, числовые значения которых для судна зависят от глубины судового хода H , осадки судна B и других факторов;

$u(t)$ — упор движителей — управление, представляемое в классической задаче оптимального управления функцией времени из класса кусочно-непрерывных функций.

Управление $u(t)$ (в относительных единицах) судном типа Волго-Дон ограничено следующими пределами:

$$-0,76 \leq u(t) \leq 1. \quad (2)$$

Расчетные значения коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 приведены в табл. 1. Уравнения (1) со значениями коэффициентов из табл. 1 справедливы для прямого хода судна при $x_2(t) \geq 0$ и всех значениях t на интервале времени движения.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициентов дифференциальных уравнений управляемого движения судна типа Волго-Дон

Параметр	Единица измерения	Множитель	Осадка судна			
			$B = 1,5 \text{ м}$		$B = 3,5 \text{ м}$	
			Глубина хода		Глубина хода	
			$H = 4 \text{ м}$	$H = 10 \text{ м}$	$H = 4 \text{ м}$	$H = 10 \text{ м}$
a_1	м^{-1}	10^{-3}	–2,49	–2,39	–1,18	–1,03
a_2	с^{-1}	10^{-2}	–1,924	–1,885	–0,386	–0,361
a_3	мс^{-2}	10^{-1}	2,18	2,18	0,40	0,40

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 зависят от осадки B судна. В приведенном случае увеличение осадки B с 1,5 м до 3,5 м приводит к изменению значений коэффициентов (например, a_3) более чем в 5 раз. Уменьшение глубины судового хода от 10 м до 4 м при определенной осадке $B = \text{const}$ вызывает увеличение коэффициентов (например, a_1) по абсолютной величине до 15 % (возрастают квадратичная и линейная зависимости сопротивления движению от скорости).

Для условий шлюзования судна представляют интерес неопределенности значений a_1 и a_2 при $H \leq 10$ м. Например, при $B = 1,5$ м и $4,0 \text{ м} \leq H \leq 10$ м параметрические интервальные неопределенности (ПИН) характеризуются интервалами: $-0,00249 \text{ м}^{-1} \leq a_1 \leq -0,00239 \text{ м}^{-1}$ и $-0,01924 \text{ с}^{-1} \leq a_2 \leq -0,01885 \text{ с}^{-1}$. На практике априорная неопределенность осадки судна устраняется в ручном или автоматическом режиме на основе измерений осадки судна. Поэтому величину осадки судна можно и целесообразно учитывать в качестве априорных сведений о математической модели (1). Априорные сведения о глубине судового хода H в зависимости от местоположения судна вдоль траектории его движения иногда известны приблизительно. Поэтому можно сделать вывод о существовании параметрических интервальных неопределенностей значений a_1 и a_2 .

Судоводителем (капитаном судна) ограничивается скорость движения судна при вводе в камеру шлюза в целях обеспечения безопасности на конечном этапе движения при торможении реверсированным вращением винтов и остановке в требуемом месте камеры шлюза. Вместе с тем актуальными являются требования обеспечения высокой пропускной способности шлюза при интенсивных судопотоках, что достигается уменьшением времени шлюзования судна за счет увеличения средней скорости движения на пути ввода в шлюз. Таким образом, целесообразно рассматривать задачу оптимального по быстродействию управления судном при ограничении скорости движения с той особенностью, что так называемый упор $u(t)$ для рассматриваемого судна создается двумя винтами (двигателями), которые могут работать независимо друг от друга при соответствующем управлении главными двигателями судна:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t), \quad (3)$$

где $u_1(t)$ и $u_2(t)$ — упоры движителей.

По условиям технической реализации процессов управления главными двигателями судна переходы с положительного упора на отрицательный и в обратном направлении имеют промежуточные состояния $u_1(t) = 0$ у одного и $u_2(t) = 0$ у другого двигателя. Длины интервалов времени этих состояний ограничиваются снизу несколькими секундами.

Результаты (Results)

Расчеты установившихся максимальных скоростей движения судна $v_{\max}(x_2(t) \rightarrow v_{\max})$ при $u(t) \rightarrow 1$, выполненные по модели (1) на основе данных табл. 1, отображены в виде графиков на рис. 1. Линии 1 и 2 показывают зависимость скорости движения при $u(t) = 1$ (работают два движителя) от осадки судна B , если глубина судового хода составляет, соответственно, 10 м и 4 м. Линии 3 и 4 показывают зависимость скорости движения при $u(t) = 0,5$ (работает один движитель) от осадки судна B , если глубина судового хода H составляет, соответственно, 10 м и 4 м. Близлежащие друг к другу две линии показывают (отсчет по вертикали) координатные интервальные неопределенности (КИН) скорости движения судна при осадках B , составляющих 1,5 м и 3,5 м, вызванных изменениями глубины по ходу движения судна в пределах $4 \text{ м} \leq H \leq 10$ м. Например, при $B = 1,5$ м и $u(t) = 1$ КИН равна 0,1 м/с, а при $B = 3,5$ м — 0,3 м/с. Координатные неопределенности рассматриваются в связи с параметрическими интервальными неопределенностями (ПИН) коэффициентов a_1 и a_2 в (1). Все возможные промежуточные зависимости $v_{\max}$ от H расположены внутри показанного на рис. 1 прямоугольника между линиями 1 и 4. Априорная КИН устраняется или, по крайней мере, уменьшается, если имеется и используется априорная информация об осадке судна и распределении глубин по траектории движения судна.

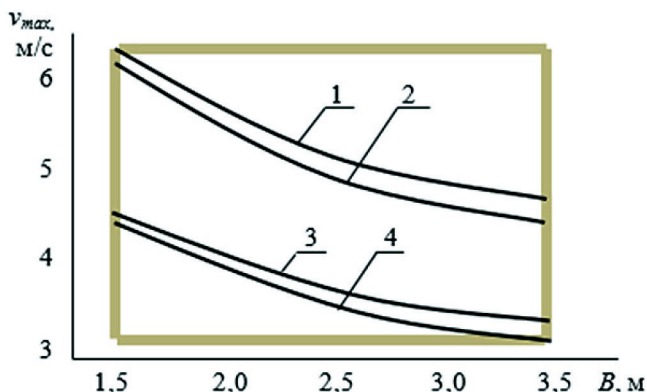


Рис. 1. Графики зависимостей установившейся максимальной скорости судна $v_{\max}$ от осадки судна B и глубины судового хода H для реальных условий эксплуатации

Fig. 1. Graphs of the dependence of the steady maximum speed of the vessel $v_{\max}$ on the vessel draft B and fairway depth H for real operating conditions

Анализ графиков показывает, что ограничение скорости $x_2(t)$, составляющее $v \leq 3,1$ м/с, может оказаться эффективным: $x_2(t) = v = 3,1$ м/с для некоторых моментов времени t при решении задачи оптимального управления даже при работе одного движителя судна $u_1(t)$ или $u_2(t)$ при любой осадке судна $1,5 \text{ м} \leq B \leq 3,5 \text{ м}$ и глубине судового хода H из диапазонов $4 \text{ м} \leq H \leq 10 \text{ м}$. Ограничение $x_2(t) \leq v = 4,6$ м/с, как показывают графики при $u(t) = 0,5$, заведомо не может быть эффективным, если работает только один движитель. Оно, как видно, может быть эффективным $x_2(t) = 4,6$ м/с во всем диапазоне значений осадки судна $1,5 \text{ м} \leq B \leq 3,5 \text{ м}$ только при работе двух движителей.

Примеры решения задач оптимального по быстродействию управления движением судна показаны на рис. 2. Скорость движения судна при вводе в камеру шлюза ограничивается, по рекомендуемым экспертным оценкам, значением $v = 2,5$ м/с. В соответствии с гипотезой полной определенности принято $H = 4$ м (поддерживаемая для шлюзов глубина судового хода). Для удобства пространственной интерпретации решений в привязке к проходимому судном пути S_i зависимость упора $u_i = u(t)$ показана не от времени t , а от расстояния $S_i = -x_1(t)$ при $x_1(t) < 0$ до места остановки судна в камере шлюза в момент времени t_k при $x_1(t_k) = 0$. Внутри интервала времени движения судна $[0, t_k]$ скорость $x_2(t) > 0$. Верхним горизонтальным участком графиков соответствует $u(t) = 1$, нижним — $u(t) = -0,76$ в соответствии с условием (2). Все графики, показанные сплошными линиями (кусочно-постоянные функции от x_1), построены для судна с осадкой $B = 1,5$ м. Пунктирными линиями показаны решения задач при $B = 3,5$ м. Все решения получены при условии соблюдения ограничения $x_2(t) \leq v = 2,5$ м/с. Значению скорости $x_2(t) = v = 2,5$ м/с соответствует упор движителей $u(t)$ из диапазона $0 < u(t) < 0,5$. По расчетам имеем два значения: $u(t) = 0,09$ при $B = 1,5$ м и $H = 4$ м; $u(t) = 0,24$ при $B = 3,5$ м, $H = 4$ м.

Очертания графика оптимального управления зависят от расстояния, на которое перемещается судно. Если $B = 1,5$ м, то при любых $S_i < 52$ м (рис. 2, а, б) последовательно реализуются вначале $u(t) = 1$, затем $u(t) = -0,76$. Продолжительности интервалов времени, на которых $u(t) = 1$ и $u(t) = -0,76$, изменяются, уменьшаясь от значений 11 с и 15 с, соответственно, при уменьшении проходимого судном пути, начиная с $S_i = 52$ м (см. рис. 2, а). При той же осадке судна $B = 1,5$ м и любых $S_i > 52$ м (см. рис. 2, в, г) последовательно реализуются вначале $u(t) = 1$, затем $u(t) = 0,09$, потом $u(t) = -0,76$. Продолжительности интервалов времени, на которых $u(t) = 1$ и $u(t) = -0,76$, не изменяются и составляют, соответственно, 11 с и 15 с. Изменяется длина интервала времени, на котором судно движется со скоростью $x_2(t) = 2,5$ м/с. При этом $u(t) = 0,09$. Например, на преодоление судном расстояния $S_i = 150$ м уходит $\tau_s = \tau_{150} = 65$ с (см. рис. 2, в), если $S_i = 250$ м, то $\tau_s = \tau_{250} = 105$ с (см. рис. 2, г). Граница между вариантами управления по последовательностям $Tem1(u) = \{u: 1 \rightarrow -0,76\}$ и $Tem2(u) = \{u: 1 \rightarrow 0,09 \rightarrow -0,76\}$ показана на рис. 2 линией cd при $S = 52$ м.

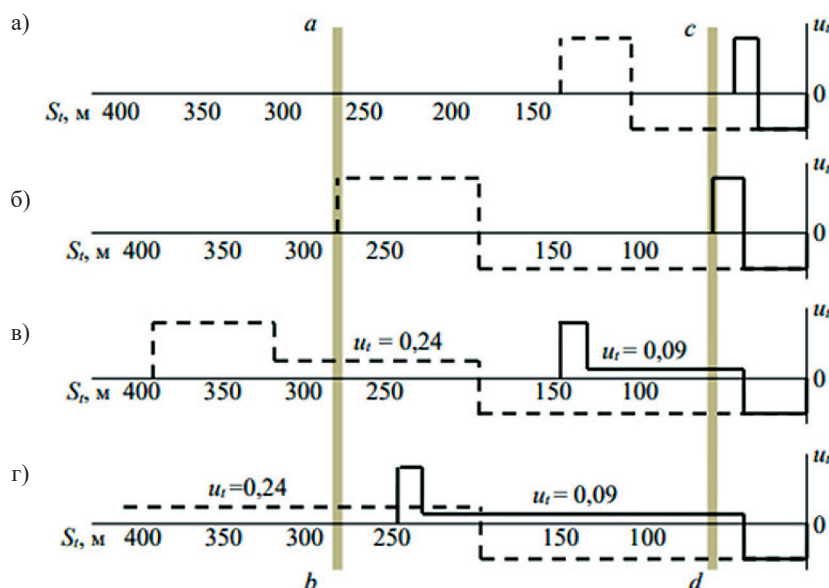


Рис. 2. Графическое представление решений задач оптимального по быстродействию управления движением судна на основе гипотезы полной определенности
Fig. 2. Graphical representation of solutions to the problems of optimal for performance control of a vessel motion based on the hypothesis of complete certainty

Числовые значения параметров движения при осадке судна $B = 3,5$ м отличаются от полученных при $B = 1,5$ м. Если $S_i < 280$ м, то управление реализуется на последовательности $Tem1(u) = \{u: 1 \rightarrow -0,76\}$ (см. рис. 2, б пунктирная линия) на времени $\tau_s < 145$ с. Как и в предыдущем случае, τ_s уменьшается от значения 145 с при уменьшении S_i (см. рис. 2, а). При $S_i > 280$ м управление реализуется на последовательности $Tem3(u) = \{u: 1 \rightarrow 0,24 \rightarrow -0,76\}$ (см. рис. 2, в, пунктирная линия) при $u(t) = 0,24$ на времени $\tau_s > 145$ с. Граница между вариантами управления из последовательностей $Tem1(u) = \{u: 1 \rightarrow -0,76\}$ и $Tem3(u) = \{u: 1 \rightarrow 0,24 \rightarrow -0,76\}$ при $B = 3,5$ м показана на рис. 2 линией ab при $S_i = 280$ м. Таким образом, скорость $x_2(t) = 2,5$ м/с поддерживается неизменной при $u(t) = 0,09$, если $B = 1,5$ м (судно без груза), и $u(t) = 0,24$, если $B = 3,5$ м (судно загружено до 5000 т).

Наличие двух движителей у судна создает неопределенность в решениях задач оптимального управления, которые показаны на рис. 2, в–г. В соответствии с терминологией, используемой Н. Н. Моисеевым в [10], указанную неопределенность можно назвать *неопределенностью распределения ресурса управления* (НРРУ). Формально она является следствием бесконечного множества решений уравнения (3) относительно $u_1(t)$ и $u_2(t)$ при заданном $u(t)$ (одно уравнение и два неизвестных), так как имеем $u(t) = 0,09$ при $B = 1,5$ м, $u(t) = 0,24$ при $B = 3,5$ м и любых фиксированных значениях t на соответствующих интервалах времени (см. рис. 2, в–г). Неопределенность устраняется, например, выполнением требования, чтобы один из двух движителей не работал во времени, когда судно движется с выбранной допустимой скоростью (в рассматриваемом случае $x_2(t) = v = 2,5$ м/с). На практике такая скорость выбирается судоводителем на основе субъективной оценки и опыта судовождения, реализуемой судоводителем путем установки в определенное положение органа управления главным двигателем, создающим упор винта.

Анализ особенностей реализаций управления со стороны УА, действующего подобно судоводителю, выполним на основе рис. 3, на котором показаны расчетные зависимости упора движителей $u_i = u(t)$ от допустимой скорости $x_2(t) = v$ при $2,5 \text{ м/с} \leq v \leq 4,0 \text{ м/с}$. Линия lm при $u_i = 0,5$ разделяет две области для графиков: выше lm $u(t) > 0,5$ необходимо, чтобы работали два движителя; ниже lm $0 < u(t) < 0,5$ любую скорость из обозначенного диапазона скоростей $2,5 \text{ м/с} \leq v \leq 4,0 \text{ м/с}$ можно поддерживать работой только одного из двух движителей. Графики 1 и 2 показывают зависимости u_i от v при осадке судна $B = 3,5$ м: 1 — для глубины судового

хода $H = 4$ м; 2 — для глубины $H = 10$ м. Слева от границы ab скорость ($v < 3,4$ м/с) может поддерживаться одним движителем, справа от cd — обязательно двумя движителями ($v > 3,6$ м/с). Между границами ab и cd возможность поддержания скорости v одним движителем зависит от глубины судового хода из диапазона $4 \text{ м} \leq H \leq 10 \text{ м}$.

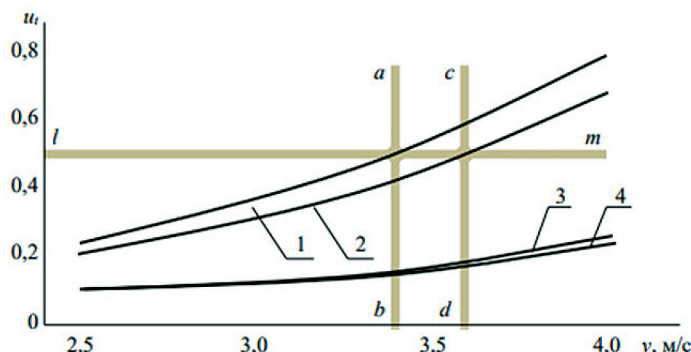


Рис. 3. Графики зависимостей упора движителей u от скорости v верхней границы допустимых скоростей движения судна
Fig. 3. Graphs of the dependences of the propulsion thrust u on the speed v of the upper limit of permissible vessel speeds

Графики 3, 4 на рис. 3 характеризуют зависимость требуемого значения упора $u_i = u(t)$ от выбранной скорости движения v из диапазона $2,5 \text{ м/с} \leq v \leq 4,0 \text{ м/с}$ при осадке судна $B = 1,5$ м. Они располагаются под линией lm в области, где скорость v может выдерживаться работой одного движителя. Линия 3 построена в расчете на глубину судового хода $H = 4$ м, линия 4 — в расчете на $H = 10$ м.

По условиям технической реализации управляющих воздействий в СЧМ «судоводитель — судно» разрывам функций $u_1(t)$ и $u_2(t)$, составляющим $u(t)$, согласно условию (3) и рис. 2, поставим в соответствие конечные значения скоростей изменения упоров движителей $\dot{x}_3(t)$ и $\dot{x}_4(t)$:

$$\begin{cases} \dot{x}_3(t) = b\omega_1; \\ \dot{x}_4(t) = b\omega_2, \end{cases} \quad (4)$$

где $b = 0,12$ (1/с) — скорость перемещения органа управления аппарата совместного управления главным двигателем;

ω_1 и ω_2 — дискретные переменные, принимающие значения, которым соответствуют вербальные представления (лингвистические переменные): -1 — уменьшить упор движителя; 0 — оставить упор движителя как есть; 1 — увеличить упор движителя.

Каждая из новых фазовых переменных $x_3(t)$ и $x_4(t)$ может изменяться согласно условиям (2) и (3) в диапазоне от $-0,38$ до $0,5$ (относительные величины). Возможные на практике комбинации перемещений органов управления упорами движителей по (4) пронумерованы ($n = 1, 2, \dots, 9$) в соответствии с данными табл. 2.

Таблица 2

Номера n комбинаций вариантов выбора перемещений органов управления упорами двух движителей

ω	$\omega_2 = 1$	$\omega_2 = 0$	$\omega_2 = -1$
$\omega_1 = 1$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 5$
$\omega_1 = 0$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 8$
$\omega_1 = -1$	$n = 6$	$n = 7$	$n = 9$

Каждой из девяти комбинаций антропоморфных перемещений органов управления движением судна $\omega_1(n)$ и $\omega_2(n)$ при фиксированном n по табл. 2 поставим в соответствие нормальную систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= a_1 x_2^2(t) + (a_2 x_2(t) + a_3) [x_3(t) + x_4(t)]; \\ \dot{x}_3(t) &= b \omega_1(n); \\ \dot{x}_4(t) &= b \omega_2(n), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

расширяющую модель (1) по размерности пространства состояний с трех до пяти: $\{t \times x_1 \times x_2\} \rightarrow \{t \times x_1 \times x_2 \times x_3 \times x_4\}$. Например, при $n = 3$ имеем $\omega_1(3) = 0$ и $\omega_2(3) = 1$.

Каждая система (5), когда $n = 1, 2, \dots, 9$, при подстановке в нее значений $\omega_1(n)$ и $\omega_2(n)$ из табл. 2 образует неполное представление элементарного управляемого движения судна, которое имеет номер n . Неполнота представления в значении, определенном Г. В. Корневым [14], создает временную и координатную неопределенности, необходимые для построения шаблона АУ. Поэтому целеуказание может быть выражено формально последовательностью номеров неполных представлений элементарных движений (5). Выполненные расчеты показывают, что при ограничении скорости движения $2,5 \text{ м/с} \leq v \leq 4,0 \text{ м/с}$ и длине пути перемещения судна $S_i < 52 \text{ м}$ из состояния неподвижности в новое состояние неподвижности целеуказанию соответствует последовательность

$$Tem1(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 1\}, \quad (6)$$

если осадка судна $B = 1,5 \text{ м}$.

Данная последовательность сохраняется для больших расстояний при увеличении осадки B судна сверх $1,5 \text{ м}$. Так, при $B = 3,5 \text{ м}$ также имеем $Tem1(n)$ в виде последовательности (6), если $S_i < 280 \text{ м}$ (см. рис. 2, а, б). Включение неполного представления движения под номером $n = 4$ в $Tem1(n)$ между номерами $n = 9$ обусловлено учетом необходимости соблюдения выдержки времени при переходе с положительного упора движителей на отрицательный упор.

Рис. 2, в, г может служить исходными сведениями для построения последовательностей неполных представлений элементарных движений в качестве шаблонов антропоморфного управления при $S_i > 52 \text{ м}$, если $B = 1,5 \text{ м}$, и при $S_i > 280 \text{ м}$, если $B = 3,5 \text{ м}$. Помехой этому является НРРУ. Устранение данной неопределенности во взаимодействии с экспертами, в качестве которых выступали капитаны судов с большим опытом судовождения, позволяет выделить приемлемую для практического применения наиболее надежную по обеспечению безопасности ввода судна в камеру шлюза последовательность

$$Tem2(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow 1\} \quad (7)$$

или

$$Tem3(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 1\}, \quad (8)$$

в зависимости от того, какой из главных двигателей, согласно табл. 2, выбран для поддержания движения судна с выбранной граничной скоростью $v = 2,5 \text{ м/с}$.

Обсуждение (Discussion)

Шаблоны АУ (6)–(8) соответствуют цели в вербальном представлении: «переместить судно от причальной стенки в камеру шлюза» [6]. Каждый элемент этих шаблонов представляет собой неполное представление элементарного движения судна вида (5). В отличие от представления элементарных движений в основе описания действий робота с интеллектуальной системой управления («интеллектуального робота») [15]–[18] используемые неполные представления движения построены в едином для них пространстве состояний СЧМ, учитываются параметрические и координатные неопределенности математического моделирования движений судна и виртуальные перемещения органов человеко-машинного интерфейса как при ручном управлении.

Анализ конструкций (6)–(8) показывает, что их составной частью является шаблон АУ:

$$Tem4(n) = \{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9\}, \quad (9)$$

который соответствует цели — *увеличить скорость судна до требуемого значения.*

Шаблон

$$Tem5(n) = \{n: 9 \rightarrow 4 \rightarrow 1\} \quad (10)$$

в условии (6) соответствует цели — *уменьшить скорость судна до требуемого значения.*

Шаблон (6) теперь можно представить иной конструкцией:

$$Tem7(n) = \{n: Tem4(n) \rightarrow 4 \rightarrow Tem5(n)\}. \quad (11)$$

Наличие неопределенностей в шаблонах АУ увеличивает возможности их применения. Например, каждый из шаблонов (6)–(11) может использоваться при любой фиксированной осадке судна из диапазона $1,5 \text{ м} \leq B \leq 3,5 \text{ м}$, глубине судового хода $4 \text{ м} \leq H \leq 10 \text{ м}$, а с учетом [9] — при любой глубине судового хода более 4 м. Кроме того, все шаблоны АУ (6)–(11), построенные на основе решения задачи оптимального по быстродействию управления перемещением судна из одной позиции в другую, могут использоваться в целеуказании и для случаев, когда экстремальная цель (максимальное быстродействие) не ставится, а, например, решается задача распределения ресурса управления на этапах увеличения скорости судна (шаблон (9)) и (или) уменьшения скорости (шаблон (10)). На основе [10] можно утверждать, что эта задача не имеет аналитического решения, а решение должно приниматься на основе экспертных оценок опытных судоводителей желательно с привлечением методов планирования взаимодействия с УА [19], [20]. В частном случае задачу распределения ресурса АУ можно представить посредством процедуры выбора «запаса» упора δu в преобразованном ограничении (2): $-0,76 + \delta u \leq u(t) \leq 1 - \delta u$, $0 < \delta u < 0,76$. Например, $\delta u = 0,1$.

Конструкциями (9)–(11) не исчерпывается множество шаблонов АУ, удобных для применения в целеуказании и планировании АУ. Например, практикуются так называемые «шлюзования с хода», когда судно не останавливается у причальной стенки перед шлюзом в ожидании начала шлюзования. Управление судном планируется таким образом, чтобы оно подошло к шлюзу к назначенному заранее моменту начала шлюзования. Для таких случаев действуют шаблоны АУ типа (6)–(8), в которых последовательность $\{n: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 9\}$, т. е. (9) заменена на (10). Воспользоваться такими шаблонами для планирования АУ при рассмотренном ограничении скорости $x_2(t) \leq v = 2,5 \text{ м/с}$ можно, если скорость подхода судна к шлюзу превышает это значение.

Предложенные конструкции шаблонов дают возможность представить предысторию эксплуатации судна на жизненном цикле с помощью последовательностей элементарных движений [21]. При этом появляется возможность использовать апостериорные сведения для обучения УА рациональным способам управления в том числе таким, которые не могут быть получены в виде решения математических задач оптимального управления, рассмотренных в данном исследовании.

Заключение (Conclusion)

Выполненное конструирование шаблонов АУ иллюстрирует на примере эргатической системы «судоводитель – судно» последовательность и содержание решения следующих задач:

- построение математической модели управляемого объекта в пространстве состояний;
- математическое описание неопределенностей, присущих модели;
- численное решение задач оптимального управления в математической постановке для концов интервалов параметрических неопределенностей;
- выделение в системе фазовых координат зон с характерными формами реализации оптимального управления;
- расширение пространства состояний и построение шаблонов АУ в виде последовательностей неполных представлений элементарных движений на основе учета неопределенностей и коррекции оптимального управления по требованиям его технической реализации как ручного управления;
- выделение типовых вложенных шаблонов в построенных последовательностях неполных представлений движения;

– построение шаблонов АУ для уровня целеуказания с применением типовых шаблонов, используемых в качестве вложенных конструкций.

Библиотека шаблонов АУ рассматривается как составная часть базы знаний при использовании технологии экспертных систем в построении УА с искусственным интеллектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тырва В. О.* О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах «человек-машина» / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2020. — Т. 21. — № 5. — С. 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274–281.
2. *Tyrva V. O.* Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation / V. O. Tyrva, A. V. Saushev, O. V. Shergina // 2020 International Russian Automation Conference (RusAuto-Con). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
3. *Тырва В. О.* Автоматизация эргатической системы «человек-машина» на основе применения в ней антропоморфного управления / В. О. Тырва // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.01.
4. *Тырва В. О.* Аналитический подход к конструированию совместного управления движением эргатической системы «судоводитель-судно» / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2021. — Т. 22. — № 9. — С. 459–467.
5. *Saushev A.* On the use of templates in joint control of the object movement of the human-machine ergatic system / A. Saushev, V. Tyrva // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. DOI: 10.1063/5.0103854.
6. *Тырва В. О.* Целеуказание совместного управления в системе «человек-машина»: моделирование и структуризация / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2023. — Т. 24. — № 2. — С. 67–74. DOI: 10.17587/mau.24.67–74.
7. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. — М.: Наука, 1976. — 392 с.
8. *Макаров И. М.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов; [отв. ред. И. М. Макарова]; Отделение информ. Технологий и вычислит. Систем РАН. — М.: Наука, 2006. — 333 с.
9. *Тырва В. О.* Моделирование эргатической системы совместного управления движением судна / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 266–277. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277.
10. *Моисеев Н. Н.* Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1974. — 528 с.
11. *Ющенко А. С.* Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1 (2). — С. 4–9.
12. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1986. — 288 с.
13. *Филимонов А. Б.* Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2018. — Т. 19. — № 9. — С. 563–578. DOI: 10.17587/mau.19.563–578.
14. *Корнев Г. В.* Цель и приспособляемость движения / Г. В. Корнев. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1974. — 528 с.
15. *Попов Е. П.* Манипуляционные роботы динамика и алгоритмы / Е. П. Попов, А. Ф. Верещагин, С. Л. Зенкевич. — М.: Наука (Главная редакция физико-математической литературы), 1978. — 400 с.
16. *Cataldi E.* Set-based inverse kinematics control of an anthropomorphic dual arm aerial manipulator / E. Cataldi, F. Real, A. Suárez, P. A. Di Lillo, F. Pierri, G. Antonelli, F. Caccavale, G. Heredia, A. Ollero // 2019 International Conference on robotics and automation (ICRA). — IEEE, 2019. — Pp. 2960–2966. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793470.
17. *Lee H.* Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload / H. Lee, H. J. Kim // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2017. — Vol. 13. — Is. 6. — Pp. 2780–2790. DOI: 10.1109/TII.2017.2692270.

18. *Jimenez-Cano A. E.* Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm / A. E. Jimenez-Cano, G. Heredia, M. Bejar, K. Kondak, A. Ollero // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. — 2016. — Vol. 230. — Is. 10. — Pp. 1860–1870. DOI: 10.1177/0954410015619442.
19. *Cooper A.* About Face 3. The Essentials of Interaction Design / A. Cooper, R. Reimann, D. Cronin. — 3rd edition. — Wiley, 2007. — 648 p.
20. *Raskin J.* The humane interface: new directions in the design of computer systems / J. Raskin. — Addison-Wesley Professional, 2000. — 233 p.
21. *Тырва В. О.* О теоретических основаниях автоматизации процессов управления в системе «человек-машина» / В. О. Тырва // *Автоматизация в промышленности*. — 2023. — № 1. — С. 47–53. DOI: 10.25728/avtprom.2023.01.08.

REFERENCES

1. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. “About realizations of compatible control impacts on the object in the man-machine systems.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 21.5 (2020): 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274–281.
2. Tyrva, Vladimir O., Aleksandr V. Saushev, and Olga V. Shergina. “Anthropomorphic Control over Electro-mechanical System Motion: Simulation and Implementation.” *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
3. Tyrva, V. O. “Avtomatizatsiya ergaticheskoi sistemy «chelovek-mashina» na osnove primeneniya v nei antropomorfnoho upravleniya.” *Automation in industry* 2 (2021): 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.01.
4. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. “Analytical approach to the design of joint motion control of the ergatic system “skipper-ship”.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 22.9 (2021): 459–467. DOI: 10.17587/mau.22.459–467.
5. Saushev, Alecsandr, and Vladimir Tyrva. “On the use of templates in joint control of the object movement of the human-machine ergatic system.” *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0103854.
6. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. “Targeting of Joint Control in the “Man-Machine” System: Modeling and Structuring.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 24.2 (2023): 67–74. DOI: 10.17587/mau.24.67–74.
7. Pontryagin, L.S., V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze, and E. F. Mishchenko. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov*. M.: Nauka, 1976.
8. Makarov, I.M., V. M. Lokhin, S. V. Man'ko, and M. P. Romanov. *Iskusstvennyi intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya*. M.: Nauka, 2006.
9. Tyrva, Vladimir O. “Modeling an ergatic system for joint control of ship motion.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 266–277. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277.
10. Moiseev, N. N. *Elementy teorii optimal'nykh sistem*. M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, izd-vo «Nauka», 1974.
11. Yuschenko, A. S. “Human-robot: compatibility and cooperation.” *Robotics and technical cybernetics* 1(2) (2014): 4–9.
12. Pospelov, D. A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. M.: Nauka, 1986.
13. Filimonov, A. B., and N. B. Filimonov. “Situational Approach in the Problems of Automation Control by Technical Objects.” *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 19.9 (2018): 563–578. DOI: 10.17587/mau.19.563–578.
14. Korenev, G. V. *Tsel' i prispособlyaemost' dvizheniya*. M., Nauka, 1974.
15. Popov, E. P., A. F. Vereshchagin, and S. L. Zenkevich. *Manipulyatsionnye roboty dinamika i algoritmy*. M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, izd-vo «Nauka», 1978.
16. Cataldi, Elisabetta, F. Real, A. Suárez, P. A. Di Lillo, F. Pierri, G. Antonelli, F. Caccavale, G. Heredia, and A. Ollero. “Set-based inverse kinematics control of an anthropomorphic dual arm aerial manipulator.” *2019 International Conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2019. 2960–2966. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793470.
17. Lee, Hyeonbeom, and H. Jin Kim. “Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload.” *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13.6 (2017): 2780–2790. DOI: 10.1109/TII.2017.2692270.

18. Jimenez-Cano, A. E., G. Heredia, M. Bejar, K. Kondak, and A. Ollero. “Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 230.10 (2016): 1860–1870. DOI: 10.1177/0954410015619442.

19. Cooper, Alan, Robert Reimann, and David Cronin. *About Face 3. The Essentials of Interaction Design*. 3rd edition. Wiley, 2007.

20. Raskin, Jef. *The humane interface: new directions in the design of computer systems*. Addison-Wesley Publishing Professional, 2000.

21. Tyrva, V. O. “O teoreticheskikh osnovaniyakh avtomatizatsii protsessov upravleniya v sisteme “chelovek-mashina”.” *Automation in industry* 1 (2023): 47–53. DOI: 10.25728/avtprom.2023.01.08.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тырва Владимир Оскарович —

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

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

e-mail: v.tyrva@mail.ru

Бова Елена Владимировна — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

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

e-mail: elena.bova2015@bk.ru

Румянцев Алексей Юрьевич —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

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

e-mail: stehnika@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyrva, Vladimir O. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: v.tyrva@mail.ru

Bova, Elena V. — Associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: elena.bova2015@bk.ru

Rumyantsev, Alexey Yu. —

PhD

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: stehnika@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 января 2024 г.

Received: January 19, 2024.

RELATIONSHIPS BETWEEN RIVER DUNE PARAMETERS WHEN APPROXIMATING THEIR LONGITUDINAL PROFILE BY A TRIANGLE

V. I. Zamyshlyayev

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The subject of the study is the geometric characteristics of river bed forms, the knowledge of which is important for solving a number of river hydraulics problems, in particular for determining the hydraulic resistance of the channel. It should be noted that many researchers consider that its value depends on the steepness of the river dunes. At the same time, there is a lot of data indicating that in addition to the dune steepness, the shape of the longitudinal relief of the bed forms, namely, the location of the crest of the dune relative to its troughs, also influences the value of hydraulic resistance. In order to take this circumstance into account, the notion of the dune asymmetry coefficient and the notion of the wetted perimeter of the dune are introduced. The application of the possibility of approximating the longitudinal profile of the dune by a triangle has allowed us to match the main elements of the triangle with the parameters of river dunes normally used in studies of the fluvial process. Since the triangle elements are connected by well-known geometric and trigonometric relations, the proposed approximation allows us to analytically derive dependences between the main parameters characterising river dunes. For clarity, the obtained relationships are presented not only in the form of formulae, but also in the form of graphs and tables. Although the task of extensive verification of the deduced relations by actual data is not set in the present paper, the obtained dependences are in good agreement with some results of statistical processing of data from field and laboratory researches given in the literature on river hydraulics, which confirms the admissibility of approximating the dune shape by a triangle and the possibility of using the deduced relationships as at least an approximate assessment of the quantitative values of the main river dune parameters.

Keywords: dune shape approximation, triangle, river dune parameters, dune asymmetry coefficient, dune wetted perimeter, dune steepness, channel hydraulic resistance.

For citation:

Zamyshlyayev, Vitaly I. "Relationships between river dune parameters when approximating their longitudinal profile by a triangle." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 236–250. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250.

УДК 556.536

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ДОННЫХ ГРЯД ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ИХ ПРОДОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

В. И. Замышляев

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

Предметом исследования являются геометрические характеристики русловых донных форм, знание которых необходимо для решения ряда задач речной гидравлики, в частности для определения гидравлического сопротивления русла. Отмечается, что многие исследователи ставят его значение в зависимость от крутизны донных гряд. Вместе с тем существует немало данных, указывающих на то, что помимо крутизны гряд влияние на величину гидравлического сопротивления оказывает также форма продольного рельефа донных форм, а именно расположение вершины гряды относительно ее подвалов. С целью учета этого обстоятельства введены понятия «коэффициент асимметричности гряды» и «смоченный периметр гряды». Применение возможности аппроксимации продольного профиля гряды треугольником позволило сопоставить основные элементы треугольника параметрам донных гряд, обычно используемых при проведении исследований руслового процесса. Поскольку элементы треугольника связаны хорошо известными геометрическими и тригонометрическими соотношениями, предлагаемая аппроксимация позволяет аналитически вывести соотношения между основными параметрами, характеризующими донные гряды. Для удобства восприятия полученные зависимости представлены не только в виде формул,

но и в виде графиков и таблиц. Несмотря на то, что в работе не ставилась задача детальной проверки выведенных соотношений фактическими данными, тем не менее полученные зависимости находятся в хорошем соответствии с некоторыми приведенными в литературе по речной гидравлике результатами статистической обработки данных натурных и лабораторных исследований, что подтверждает допустимость аппроксимации формы гряды треугольником и возможность использования выведенных зависимостей в качестве по крайней мере приближенной оценки количественных значений основных параметров.

Ключевые слова: аппроксимация формы гряды, треугольник, параметры донных гряд, коэффициент асимметричности гряды, смоченный периметр гряды, крутизна гряды, гидравлическое сопротивление русла.

Для цитирования:

Замышляев В. И. Соотношения между параметрами донных гряд при аппроксимации их продольного сечения треугольником / В. И. Замышляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 236–250. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250.

Введение (Introduction)

Для решения многих задач речной гидравлики и построения математических и основанных на них численных моделей движения потока по речному руслу и пойме необходимо знать гидравлическое сопротивление русла, характеризующее различными показателями: коэффициентами Шези, Маннинга, Дарси – Вейсбаха и т. д., для расчета которых предложено огромное количество формул. Общеизвестно, что на гидравлическое сопротивление русла потоку оказывает влияние не только сопротивление зернистой шероховатости, определяемое размером и формой частиц донных отложений русла, но и множество других факторов, среди которых форма поперечного сечения русла, его плановая конфигурация; резкие местные расширения русла или его разветвления; характер взаимодействия руслового и пойменного потоков; наличие и характер ледового покрова и растительности в русле и на пойме; наличие в русле и на пойме искусственных сооружений, таких, например, как мосты, водозаборы или водовыпуски; режим неустановившегося движения потока и т. д. Однако в процессе исследования гидравлического сопротивления русла необходимо также учитывать хорошо известное обстоятельство, свидетельствующее о том, что при движении потока по речному размываемому руслу, т. е. руслу, сложенному из несвязанного материала, на дне потока почти всегда появляются похожие на волны аллювиальные образования, имеющие различные размеры и формы. Довольно часто на теле более крупных донных образований могут находиться образования меньшего размера, в результате чего рельеф речного дна представляет собой достаточно сложную суперпозицию волн различных порядков. Такое строение дна оказывает существенное влияние на формирование гидродинамической структуры потока и, соответственно, при определении величины гидравлического сопротивления русла необходимо учитывать так называемую *грядовую шероховатость дна*, т. е. сопротивление, оказываемое донными формами. Поэтому вопрос изучения рельефа дна в сочетании с другими факторами, определяющими режим руслового потока и морфологию русла, имеет важное значение.

В течение многих десятилетий при исследовании вопросов гидравлических сопротивлений основным способом изучения рельефа дна речного русла являлось выделение донных наносных форм, рассматриваемых как элементы грядовой шероховатости дна (и не только), и поиск закономерностей, связывающих морфометрические характеристики рельефа дна со свойствами наносов, главным образом донных, с одной стороны, а с другой — с гидродинамическими характеристиками потока. При таком подходе адекватное описание рельефа дна означало адекватное описание донных образований, что предполагало выделение (идентификацию) как самих этих образований, так и тех элементов (параметров), характеризующих их геометрическую форму, которыми обычно оперируют при изучении закономерностей речной гидравлики и руслового процесса. Несмотря на длительный период проведения подобных исследований многие специалисты отмечают, что до сих пор отсутствует надежная информация о параметрах гряд [1], поэтому целью настоящей статьи, являющейся по-прежнему актуальной, служит поиск зависимостей между численными значениями параметров гряд.

Два из четырех структурных уровня, выделяемых в гидроморфологической теории руслового процесса, связаны главным образом не с плановой формой русла и поймы, а именно с рельефом дна — *уровнем микроформ*, к которым относят рифели, гряды и антидюны, и *уровнем мезоформ*, к которым относят перекааты, осередки и небольшие острова. В данной работе предметом исследования являются микроформы, в основном гряды (дюны), несмотря на то, что полученные зависимости в большой степени могут быть применены к рифелям и антидюнам. Несмотря на то, что чаще всего гряды имеют трехмерную форму, при их теоретическом описании, как правило, используется двухмерная идеализация, при которой продольное сечение донной формы (в направление течения воды) можно представить в виде рис. 1.



Рис. 1. Идеализация продольного сечения двухмерной гряды
(движение потока справа налево)

Fig. 1. Idealization of the longitudinal profile of a two-dimensional river dune
(flow movement from right to left)

Таким образом, донная форма — гряда — обычно идентифицируется как образование, лежащее между двумя локальными минимумами отметок донной поверхности. Эти минимумы называются, соответственно, *верхним и нижним по течению подвальями гряды*, а максимальная отметка поверхности дна в пределах гряды — ее *гребнем (вершиной)*. Также обычно выделяют *напорный* (лобовой, верховой) и *тыловой* (низовой) *склоны гряды*. Для количественных характеристик геометрической формы гряды чаще всего используют следующие показатели (см. рис. 1): длина гряды λ , высота гряды h , угол тылового склона α_1 , угол напорного склона α_2 , а также производные показатели от этих параметров, такие, например, как *крутизна гряды*, представляющая собой отношение высоты гряды к ее длине h / λ (далее в некоторых случаях будем обозначать этот показатель через ψ). При исследовании вопросов, связанных, например, с расходом донных наносов, важное значение также имеет такой динамический показатель, как скорость движения гряды (в данной работе не рассматривается).

Прежде чем перейти к анализу численных значений указанных параметров, необходимо отметить, что в действительности при рассмотрении гряд даже в таком идеализированном виде их подвалья (верхнее и нижнее) не всегда имеют одинаковые отметки по высоте, т. е. соединяющая их линия не всегда является горизонтальной. По этой причине существует некоторая произвольность идентификации указанных параметров и прежде всего длины и высоты гряды. Обычно за длину гряды принимают расстояние между верхним и нижним подвальями гряды, но поскольку соединяющая их линия не обязательно является горизонтальной, в одних случаях за длину гряды принимают непосредственно длину данного отрезка, в других — длиной гряды считают проекцию этого отрезка на ось x , которая в свою очередь может выбираться не горизонтальной, а имеющей наклон, равный среднему уклону потока / русла.

В некоторых случаях за длину гряды принимают расстояние между гребнями соседних гряд, но и в этом случае существует альтернатива: считать ли длиной гряды длину соединяющего гребни гряды отрезка или его проекцию на ось x . Кроме того, возникает дополнительная неопределенность: к какой из двух участвующих в процедуре измерения гряд (верхней или нижней) относить полученное значение. Такая же альтернативность существует и в отношении высоты гряды,

за которую в одних случаях принимают превышение отметки гребня гряды над отметками нижнего подвалья, в других — превышение отметки гребня гряды над отметками верхнего подвалья, а иногда — длину перпендикуляра, опущенного из гребня гряды на линию, соединяющую верхнее и нижнее подвалья гряды. При этом следует заметить, что если линия, соединяющая подвалья гряды, горизонтальна, то все эти три значения совпадают (о существующей неопределенности в этом вопросе также отмечается в работах [2], [3]). В настоящей работе примем, что линия, соединяющая подвалья гряды, является горизонтальной, и, соответственно, в дальнейшем за длину гряды будем принимать расстояние между ее подвальями, а за высоту — длину перпендикуляра, опущенного из гребня гряды на линию, соединяющую подвалья гряды.

Многие исследователи, занимавшиеся изучением морфометрических характеристик грядового рельефа дна, отмечали в своих работах (см., например, [4], [5] и др.), что среди факторов, оказывающих существенное влияние на гидравлическое сопротивление русла, важное значение имеет крутизна гряд h / λ . Существует большое количество формул, авторы которых ставят гидравлическое сопротивление в зависимость от крутизны донных форм. Такое мнение представляется вполне логичным, поскольку эта величина, по сути, характеризует шероховатость дна, обусловленную наличием донных волн, и поэтому численные значения данного параметра в различных гидравлических условиях представляют безусловный интерес. Вместе с тем представляется вполне очевидным, что на гидравлическое сопротивление, которое подстилающая поверхность оказывает потоку, должен оказывать влияние не только относительный размер выступов шероховатости ложа потока, но и характерные формы таких выступов.

Проведем мысленный эксперимент, представив два жестких (неразрываемых) гидравлических лотка, имеющих уклоны и одинаковые поперечные сечения (например, прямоугольные), в которые через начальное сечение подается одинаковый расход воды. Представим также, что дно этих лотков сформировано из одного и того же материала, т. е. с одинаковой крупностью зерен, и на дне лотков искусственно созданы волнообразные формы, похожие на речные гряды. Пусть отношение амплитуды этих волн к их характерной длине будет в среднем одинаковым в обоих лотках, но одновременно эти волны будут иметь существенно различную форму (например, различное расположение максимумов отметок волн относительно их длины). Навряд ли кто-либо станет оспаривать тот факт, что при таких условиях гидравлическое сопротивление потоку в этих двух лотках может быть различным. Свидетельства этому можно найти также в проведенных натурных исследованиях. Например, в работе [6] выполнено исследование большого объема данных — изучены донные формы на крупнейших реках: Амазонке, Жёлтой реке, Миссисипи и др. Показано, что угол наклона тылового склона дюн, который на малых реках и в лабораторных лотках часто считают близким к углу естественного откоса песка под водой, на больших реках имеет гораздо меньшие значения — преимущественно менее 10° . Такая геометрия дюн может, по мнению авторов, существенно изменяться характер гидравлического сопротивления грядового дна, поскольку меняется геометрия турбулентного потока, расположение и размеры турбулентных вихрей в тыловых зонах гряд. Таким образом, пологий угол тылового склона может существенно снижать «грядовую» компоненту гидравлического сопротивления русла. Доводы авторов представляются вполне разумными, поэтому исследование параметров формы гряды, связанных с ее асимметричностью, является вполне актуальным и показатель, характеризующий асимметричность донных форм, понимаемый в контексте данной работы как *асимметричность продольного профиля гряды*, должен учитываться при изучении, по крайней мере, вопросов, связанных с гидравлическим сопротивлением речных русел. Однако этому фактору уделено недостаточное внимание и имеется лишь небольшое количество работ, в которых исследована продольная асимметричность формы донных образований.

Ввиду вышеизложенного для изучения морфометрических зависимостей, учитывающих форму донных образований, помимо относительной величины выступов шероховатости, характеризующей чаще всего значением крутизны гряды h / λ , необходимо ввести еще некоторые параметры, а именно показатель (коэффициент) асимметричности гряды и параметр, характеризующий

длину гряды от верхнего до нижнего подвала гряды, измеренную не по прямой, а по контуру гряды. По аналогии с известным показателем поперечного сечения русла назовем последний параметр *смоченным периметром гряды*, обозначив его через L . В некоторых работах (например, [3]) исследованы статистики этого параметра и его слагаемых L_1 и L_2 .

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для исследования зависимостей между некоторыми из указанных параметров можно без существенной потери точности аппроксимировать представленную ранее двухмерную идеализацию гряды (см. рис. 1) треугольником, длина наибольшей (нижней) стороны которого равна длине гряды λ , а длина нормали из противостоящей вершины треугольника на эту наибольшую сторону — высоте гряды h (рис. 2).

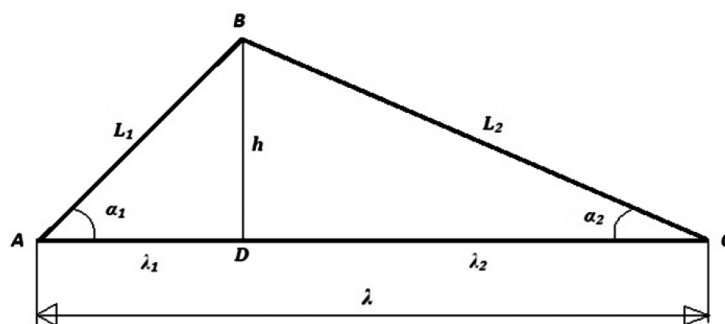


Рис. 2. Схематизация гряды в виде треугольника ABC
(движение потока справа налево)

Fig. 2. Schematization of the dune by a triangle ABC
(flow movement from right to left)

На допустимость подобной аппроксимации указывается также в работах [3], [7, с. 122] и др. Будем также считать, что наибольшая сторона треугольника горизонтальна. Тогда справедливо приведенное ранее замечание по поводу независимости значений высоты и длины гряды от способа их определения. Применение такой аппроксимации формы гряды позволяет использовать хорошо известные соотношения из геометрии и тригонометрии и легко получить связи между всеми указанными ранее и приведенными на рис. 2 параметрами или их комбинациями. В частности, можно рассчитать зависимость значений смоченного периметра гряды L , а также его слагаемых L_1 и L_2 от крутизны гряды h/λ , причем L при одних и тех же значениях h/λ дополнительно зависит от положения вершины треугольника (гребня гряды) вдоль линии, соединяющей подвалы, т. е. от степени асимметричности гряды.

Таким образом, основным методом, используемым в данной работе, является аппроксимация продольного профиля гряды треугольником, что позволило применить хорошо развитый аппарат анализа геометрических и тригонометрических соотношений и вывести аналитическим путем зависимости между теми элементами треугольника, которые соответствуют основным измерителям, используемым на практике для описания геометрических форм донных гряд.

Результаты (Results)

Исходя из того, что треугольники ABD и CBD являются прямоугольными, и из очевидных равенств:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_1 + \lambda_2; \\ L &= L_1 + L_2,\end{aligned}\tag{1}$$

имеем следующие соотношения:

$$L_1 = \sqrt{\lambda_1^2 + h^2} = \lambda_1 \sqrt{1 + (h/\lambda_1)^2} = \lambda_1 \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha_1)^2};\tag{2}$$

$$L_2 = \sqrt{\lambda_2^2 + h^2} = \lambda_2 \sqrt{1 + (h / \lambda_2)^2} = \lambda_2 \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha_2)^2}; \quad (3)$$

$$L = \lambda_1 \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha_1)^2} + \lambda_2 \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha_2)^2}. \quad (4)$$

Очевидно, что при одном и том же значении крутизны гряды, ряд ее геометрических характеристик будут зависеть от асимметричности продольного профиля гряды, т. е. от положения ее гребня (вершины треугольника) относительно ее подвалов. Несмотря на то, что показатель асимметричности треугольника может быть учтен различными способами, например, через соотношение углов при основании треугольника, в дальнейшем асимметричность гряды будем в основном характеризовать одним из двух коэффициентов:

$$k = \lambda_1 / \lambda \quad (5)$$

или

$$k_* = \lambda_1 / \lambda_2. \quad (6)$$

Для речных гряд, для которых типичной ситуацией является превышение длины напорного склона над длиной тылового склона, значения этих показателей не выходят за пределы следующих диапазонов:

$$0 < k \leq 0,5;$$

$$0 < k_* \leq 1. \quad (7)$$

Заметим, что пределы значений для k и k_* , указанные в соотношениях (7), следуют не из каких бы то ни было геометрических ограничений, присущих треугольникам, а лишь из представлений о геометрической форме, приписываемой речным микроформам, для которых гребень всегда располагается между двумя подвалами. Значения коэффициента асимметричности в диапазоне $0,5 < k \leq 1$ будут означать, что напорный склон таких донных форм меньше по длине тылового склона, что не характерно для речных гряд. Теоретически допустимое для треугольников значение $k_* > 1$ означало бы, что гребень гряды расположен ниже по течению, чем нижнее подвалье гряды, что для гряд, сложенных несвязными материалами, разумеется, невозможно. В связи с этим возникает вопрос: если при обработке батиграмм наблюдаются иные значения, чем указанные в соотношениях (7), т. е. если $k > 0,5$ и $k_* > 1$, то такие донные формы должны рассматриваться как гряды или как дефекты обработки батиграмм. По-видимому, такие неровности профиля на батиграммах не следует идентифицировать как донные микроформы, их следует просто игнорировать.

Нетрудно вывести соотношение между k и k_* :

$$k = \lambda_1 / \lambda = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 (1 + \lambda_1 / \lambda_2)} = \frac{k_*}{1 + k_*} \quad (8)$$

и, соответственно,

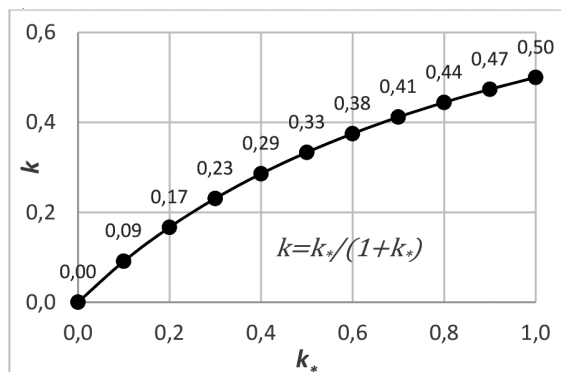
$$k_* = \frac{k}{1 - k}. \quad (9)$$

Очевидно также, что

$$\lambda_2 / \lambda = (\lambda - \lambda_1) / \lambda = 1 - k. \quad (10)$$

Зависимости между коэффициентами асимметричности k и k_* показаны на рис. 3.

а)



б)

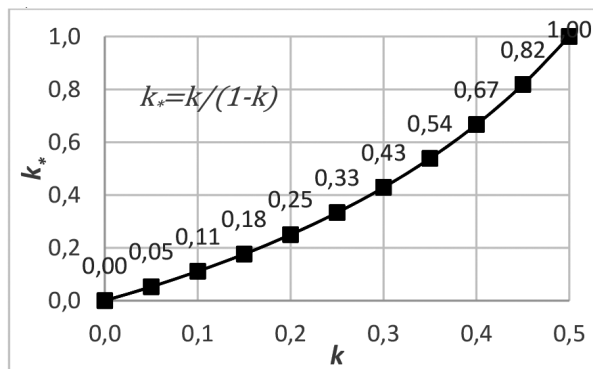


Рис. 3. Графики зависимостей:

а — k от k_* ; б — k_* от k

Fig. 3. Dependency graphs of:

а — k versus k_* ; б — k_* versus k

С учетом соотношения (5) уравнения (2)–(4) можно переписать в следующем виде:

$$L_1 / \lambda = \frac{(\lambda_1 / \lambda)}{\cos \alpha_1} = \frac{k}{\cos \alpha_1}; \quad (11)$$

$$L_2 / \lambda = \frac{(\lambda_2 / \lambda)}{\cos \alpha_2} = \frac{[(\lambda - \lambda_1) / \lambda]}{\cos \alpha_2} = \frac{1 - k}{\cos \alpha_2}; \quad (12)$$

$$L / \lambda = \frac{k}{\cos \alpha_1} + \frac{1 - k}{\cos \alpha_2}. \quad (13)$$

Различные исследователи в своих работах указывают разные диапазоны значений крутизны гряд. Например, в работе [5, с. 164] указан диапазон h / λ от 0,005 до 0,08–0,2, в монографии [7, с. 123] указаны значения от 0,08 до 0,5, в [8] — от 0,02 до 0,1; в [9] — от 0,05 до 0,2; в [4] — от 0,01 до 0,2. Ввиду нерегулярного характера рельефа речного дна и существующих методов обработки данных батиметрии крайне сомнительным является причисление к грядам донного образования, крутизна которого равнялась бы 0,01, а тем более 0,005, т. е. считать грядой образование, у которого характерный вертикальный размер составляет всего 0,01, а тем более 0,005 характерного горизонтального размера. Скорее, такие образования на батиграммах следует трактовать как *случайные отклонения* (возмущения), связанные с тем, что однонаправленные срезы батиграмм не вполне совпадают с действительным направлением перемещения донных гряд и что формы гряд существенно трехмерны. Тем не менее в данной работе зависимости относительного смоченного периметра гряды L / h от ее крутизны были рассчитаны для значений h / λ в диапазоне от 0,01 до 0,55, используя в качестве параметра различные значения коэффициентов асимметричности гряды k и k_* . Характер этих зависимостей на всем диапазоне наблюдавшихся значений крутизны гряд имеет примерно одинаковый вид для любых значений коэффициентов асимметричности гряд, что видно из семейства параметрических графиков, приведенного на рис. 4, а — кривые практически сливаются на всем диапазоне значений крутизны. Вместе с тем в большинстве случаев наблюдаемые значения крутизны гряд все же лежат в диапазоне от 0,1 до 0,3, поэтому на рис. 4, б представлен укрупненный фрагмент того же графика для наиболее типичных значений крутизны гряд; $0,1 \leq h / \lambda \leq 0,3$. Эти же зависимости для указанного диапазона значений h / λ представлены в табл. 1.

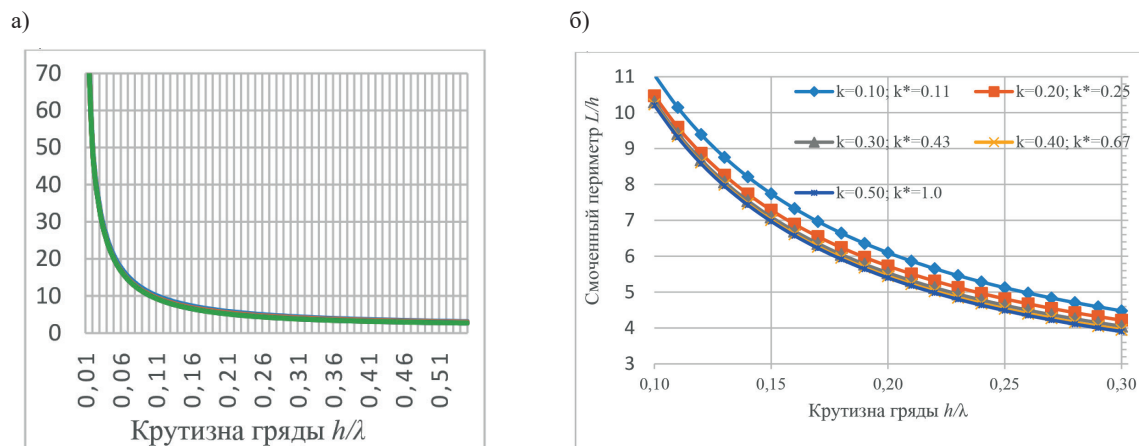


Рис. 4. Зависимость относительного смоченного периметра гряды L/h от ее крутизны h/λ :

a — в диапазоне значений h/λ от 0,01 до 0,55; b — в диапазоне значений h/λ от 0,1 до 0,3

Fig. 4. Dependence of the relative wetted perimeter of the dune L/h on its steepness h/λ :

a — in the range of h/λ values from 0.01 to 0.55; b — in the range of h/λ values from 0.1 to 0.3

Таблица 1

Значения смоченного периметра гряды, отнесенного к ее высоте L/h ,
при различных значениях крутизны h/λ и асимметричности гряд k и k_*

h/λ	L/h				
	$k = 0,10$ $k_* = 0,11$	$k = 0,20$ $k_* = 0,25$	$k = 0,30$ $k_* = 0,43$	$k = 0,40$ $k_* = 0,67$	$k = 0,50$ $k_* = 1,00$
0,10	10,47	10,30	10,23	10,21	10,20
0,11	9,59	9,42	9,35	9,32	9,31
0,12	8,87	8,68	8,61	8,58	8,57
0,13	8,26	8,07	7,99	7,96	7,95
0,14	7,73	7,54	7,46	7,43	7,42
0,15	7,28	7,09	7,01	6,97	6,96
0,16	6,89	6,70	6,61	6,57	6,56
0,17	6,55	6,36	6,27	6,22	6,21
0,18	6,24	6,05	5,96	5,92	5,90
0,19	5,97	5,78	5,69	5,64	5,63
0,20	5,73	5,54	5,44	5,40	5,39
0,21	5,51	5,32	5,22	5,18	5,16
0,22	5,31	5,12	5,03	4,98	4,97
0,23	5,13	4,94	4,85	4,80	4,79
0,24	4,96	4,78	4,68	4,64	4,62
0,25	4,81	4,63	4,54	4,49	4,47
0,26	4,67	4,50	4,40	4,35	4,34
0,27	4,55	4,37	4,27	4,22	4,21
0,28	4,43	4,26	4,16	4,11	4,09
0,29	4,32	4,15	4,05	4,00	3,99
0,30	4,22	4,05	3,95	3,90	3,89

Ранее в работе отмечалось, что гидравлическое сопротивление грядового дна во многом определяется значениями крутизны гряд. В этой связи интерес может представлять характер

зависимостей между крутизной гряды h/λ , углом тылового склона гряд α_1 и коэффициентом симметричности гряды, которые определяются с помощью той же идеализированной треугольной модели формы гряды.

Из очевидных геометрических и тригонометрических соотношений имеем (см. рис. 2):

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\lambda_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{\lambda_2(1 + \lambda_1/\lambda_2)} = \frac{k_* \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{1 + k_*} = \frac{k_*}{1 + k_*} \operatorname{tg} \alpha_1 = k \cdot \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (11)$$

Аналогично получим

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{h}{\lambda_2(1 + \lambda_1/\lambda_2)} = \frac{h}{\lambda_2(1 + k_*)} = (1 - k) \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (12)$$

Параметрические графики зависимости крутизны гряд h/λ от k для некоторых характерных значений угла α_1 приведены на рис. 5, а. На рис. 5, б показаны аналогичные графики зависимости крутизны гряд h/λ от угла α_1 при различных значениях параметра k (k_*).

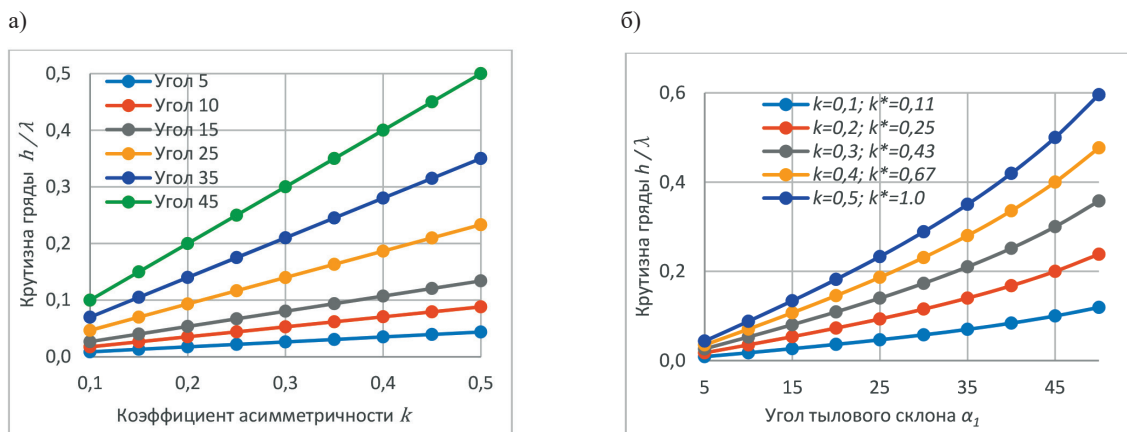


Рис. 5. Зависимость крутизны гряд h/λ : а — от коэффициента асимметрии k ; б — от угла α_1
 Fig. 5. Dependence of dune steepness h/λ on: а — asymmetry coefficient k ; б — angle α_1

Можно отметить следующие численные значения крутизны гряд:

$$\begin{aligned} \frac{h}{\lambda} &= 0 \text{ при } k_* = 0 (k = 0); \\ \frac{h}{\lambda} &= \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha_2 \text{ при } k_* = 1 (k = 0,5). \end{aligned} \quad (13)$$

Заметим, что для различных коэффициентов асимметрии значения крутизны гряды не выходят за пределы, указанные на рис. 6.

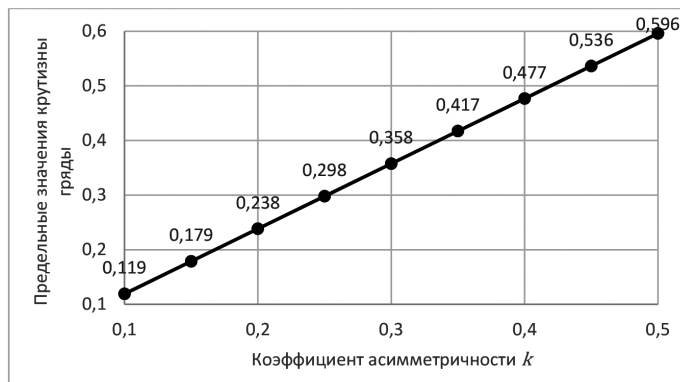


Рис. 6. Предельные значения крутизны гряды при различных коэффициентах асимметрии
 Fig. 6. Limit values of dune steepness for various asymmetry coefficients

Эти пределы находят свое отражение в характере графиков, приведенных на рис. 7.

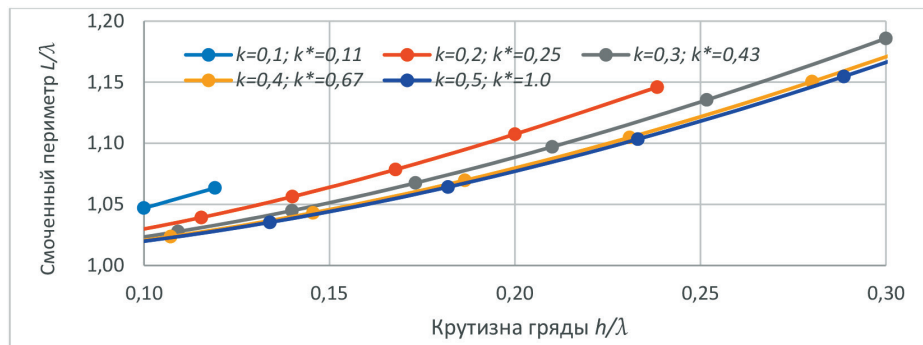


Рис. 7. Зависимость относительного смоченного периметра гряды L/λ от ее крутизны h/λ при различных коэффициентах асимметрии k (k_*)

Fig. 7. Dependence of the relative wetted perimeter of the dune L/λ on its steepness h/λ for various asymmetry coefficients k (k_*)

Из соотношений (10) и (11) с учетом равенства (8) имеем

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = k_* \cdot \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (14)$$

Используя аппроксимацию формы гряды треугольником, можно легко выразить или рассчитать разнообразные зависимости для элементов треугольника (гряды) или для их комбинаций (например, α_1 / α_2 (или α_2 / α_1), L_1 / L_2 (или L_2 / L_1), L / λ , L / L_1 (или L / L_2), L_1 / λ_1 (или L_2 / λ_2) и т. д.).

Например, значение L_1 / L_2 рассчитывается с помощью теоремы Пифагора:

$$h^2 = L_1^2 - \lambda_1^2 = L_2^2 - \lambda_2^2.$$

Тогда

$$L_2^2 - L_1^2 = \lambda_2^2 - \lambda_1^2,$$

откуда

$$L_2^2 \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] = \lambda_2^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^2 \right] = \lambda_2^2 (1 - k_*^2). \quad (15)$$

Наконец, учитывая тригонометрическое соотношение для треугольника DBC , получим

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{1 - (\cos \alpha_2)^2 (1 - k_*^2)}. \quad (16)$$

Аналогичным образом получим

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{1}{k_*} \sqrt{k_*^2 + (\cos \alpha_1)^2 (1 - k_*^2)}. \quad (17)$$

Таким образом, соотношения между L_1 и L_2 можно выразить как функцию любого из углов α_1 или α_2 , имея k_* в качестве параметра.

Поскольку по определению

$$\alpha_1 = \operatorname{ctg} \left(\frac{h}{\lambda_1} \right), \quad (18)$$

из очевидного равенства (см. рис. 2):

$$h = \lambda_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (19)$$

получим

$$h/\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 = k \cdot \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (20)$$

откуда

$$k = \frac{h/\lambda}{\operatorname{tg} \alpha_1} = (h/\lambda) \cdot \operatorname{ctg} \alpha_1. \quad (21)$$

Выражение для k через угол α_2 имеет следующий вид:

$$k = 1 - \frac{h/\lambda}{\operatorname{tg} \alpha_2} = 1 - (h/\lambda) \cdot \operatorname{ctg} \alpha_2. \quad (22)$$

Таким же образом получаются выражения для k_* , т. е. для λ_1/λ_2 и для λ_2/λ_1 , но при этом нужно помнить приведенное ранее замечание о характерных для речных гряд значениях коэффициента асимметрии. Графики зависимости k от α_1 приведены на рис. 8 при различных значениях параметра крутизны гряд в диапазоне характерных значений k в связи с тем, что поле точек в указанных координатах приведено в работе [10].

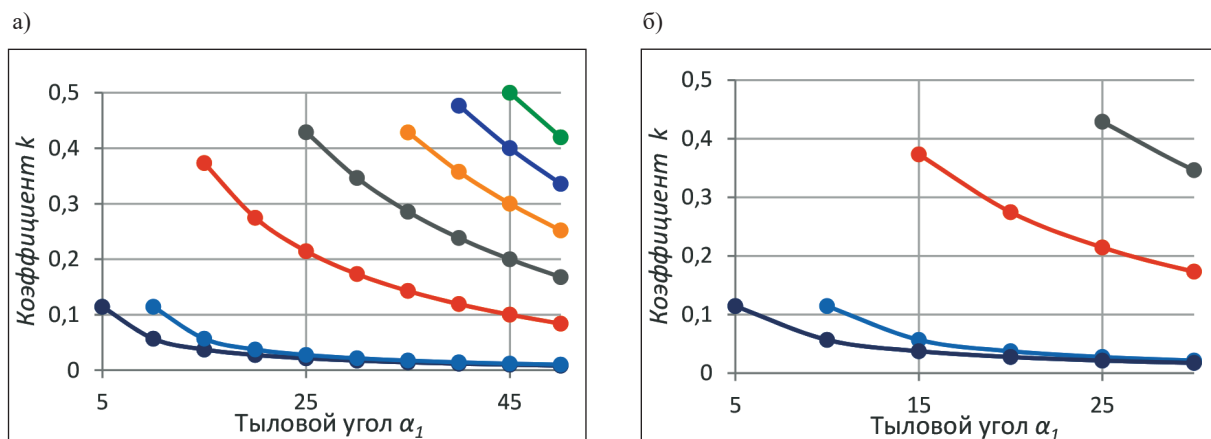


Рис. 8. Зависимость коэффициента асимметрии k от угла тылового склона α_1

при различных значениях крутизны гряды ψ :

a — углы от 5° до 50° ; $б$ — углы от 5° до 30°

Fig. 8. Dependence of the asymmetry coefficient k on the leeside angle α_1

for different values of the dune steepness ψ :

a — angles from 5° to 50° ; b — angles from 5° to 30°

Длина тылового склона определяется в виде

$$L_1 = \sqrt{h^2 + \lambda_1^2}. \quad (23)$$

Параметры напорной части гряды определяются следующим образом:

$$\lambda_2 = \lambda - \lambda_1; \quad (24)$$

$$L_2 = \sqrt{h^2 + \lambda_2^2}; \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \operatorname{ctg} \left(\frac{h}{\lambda_2} \right). \quad (26)$$

Аналогичным образом можно получить связи также между другими рассмотренными здесь параметрами в случае, если они представляют интерес для исследований (например, приведенные на рис. 9 графики зависимости показателя асимметричности гряды α_1/α_2 от угла тылового склона α_1 при различных значениях коэффициентов асимметричности k (k_*)).

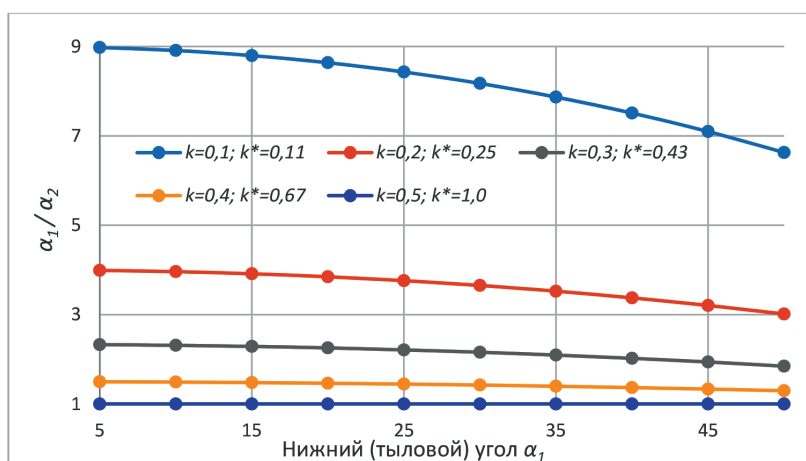


Рис. 9. Зависимость показателя асимметричности гряды α_1 / α_2 от ее угла тылового склона α_1 при различных коэффициентах асимметричности k (k_*)

Fig. 9. Dependence of the dune asymmetry index α_1 / α_2 on its leeside angle α_1 for different asymmetry coefficients k (k_*)

В табл. 2 указаны вычисленные на основании вышеприведенных формул значения показателя α_2 / α_1 , также характеризующего асимметричность гряд при различных значениях угла тылового склона α_1 (первая строка) и различных значениях коэффициента асимметричности k (первый столбец).

Таблица 2

Значения показателя α_2 / α_1 при различных значениях α_1 и k

$\alpha_1 \backslash k$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15
0,15	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,22	0,24
0,20	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33
0,25	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41	0,43
0,30	0,43	0,43	0,44	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49	0,52	0,54
0,35	0,54	0,54	0,55	0,55	0,56	0,58	0,59	0,61	0,63	0,65
0,40	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69	0,70	0,71	0,73	0,75	0,77
0,45	0,82	0,82	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85	0,86	0,87	0,89
0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

В работе [11], на основании проведения статистического анализа большого массива данных, характеризующих геометрические параметры дюн на четырех участках реки Миссисипи (всего было обследовано 3258 дюн), среднее значение показателя α_2 / α_1 составляет 0,58. Если рассчитать среднее значение этого показателя α_2 / α_1 по данным табл. 2, то оно составит 0,51. Близость этих значений свидетельствует о том, что рассматриваемая в данной работе аппроксимация формы продольного профиля гряды треугольником является вполне допустимой. В работе [11] авторы также вводят в рассмотрение отрезки линии между подвальями гряды и точкой проекции гребня гряды на прямую, соединяющую подвалья гряды, т. е. в ней введены аналоги значений элементов λ_1 и λ_2 , однако анализ этих значений не выполнен.

Формулы (12)–(24) и аналогичные соотношения позволяют построить параметрические графики, отражающие зависимость между любыми двумя выбранными показателями, фиксируя третий показатель в качестве параметра. В частности, можно построить зависимости не только для всего смоченного периметра гряды L , но и для его составляющих L_1 и L_2 ($L = L_1 + L_2$), отнеся

их к какому-нибудь характерному размеру. Например, на рис. 10–12 представлены зависимости относительного смоченного периметра гряды L от угла тылового склона α_1 при различных коэффициентах асимметрии. Разница между ними заключается в параметре, используемом для нормирования величины L : на рис. 10 смоченный периметр отнесен к длине гряды λ , на рис. 11 — к составляющим смоченного периметра L_1 и L_2 соответственно, на рис. 12 — к высоте гряды h .

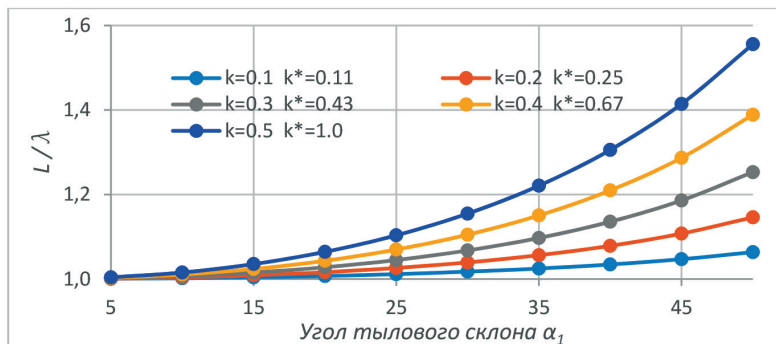


Рис. 10. Зависимость относительного смоченного периметра гряды L/λ от угла тылового склона α_1 при различных коэффициентах асимметрии
Fig. 10. Dependence of the relative wetted perimeter of the dune L/λ on the leeside angle α_1 for various asymmetry coefficients

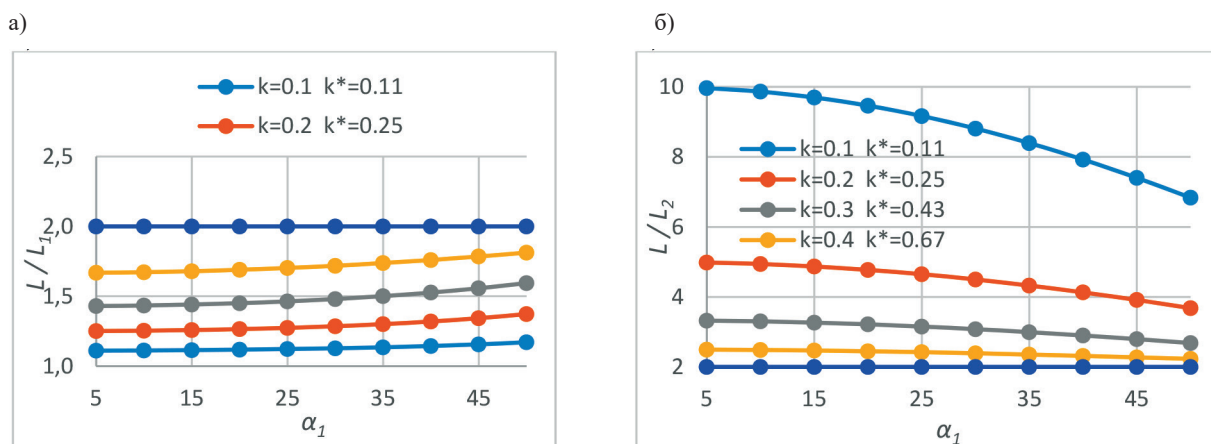


Рис. 11. Зависимость относительного смоченного периметра гряды от угла α_1 при различных значениях коэффициента асимметрии k : а — L/L_1 ; б — L/L_2
Fig. 11. Dependence of the relative wetted perimeter of the dune on the angle α_1 for different values of the asymmetry coefficient k : а — L/L_1 ; б — L/L_2

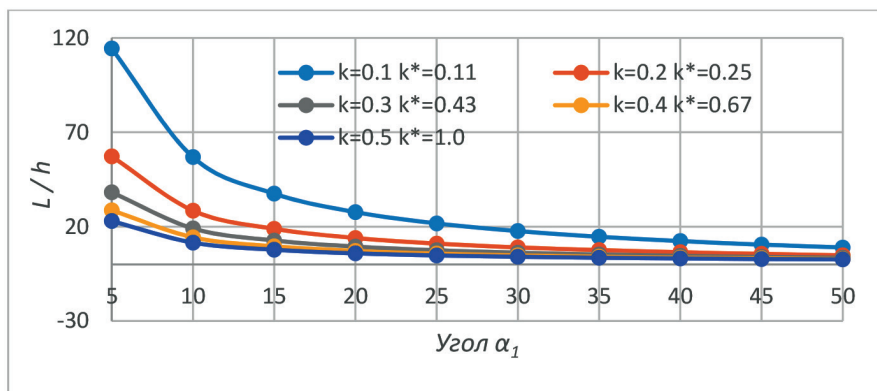


Рис. 12. Зависимость относительного смоченного периметра гряды L/h от угла α_1
Fig. 12. Dependence of the relative wetted perimeter of the dune L/h on the angle α_1

Впоследствии предполагается выполнить углубленную проверку соотношений, полученных в данной работе, на основе данных натурных и лабораторных наблюдений.

Заключение (Conclusion)

Основные результаты данной работы заключаются в следующем:

1. Отмечается, что для правильного определения гидравлического сопротивления потока важно учитывать не только показатель, характеризующий относительный размер выступов донных образований — крутизну гряд, но и параметр, учитывающий асимметрию гряд, — *коэффициент асимметрии*.

2. Отмечается, что в некоторых случаях для исследований закономерностей руслового процесса полезным оказывается введенный в данной работе показатель, характеризующий длину гряды, измеренную по контуру гряды, так называемый *смоченный периметр гряды*.

3. На основании аппроксимации продольного профиля донной гряды треугольником выведены зависимости между некоторыми показателями, используемыми в исследованиях по речной гидравлике и русловому процессу, в частности:

- зависимость смоченного периметра гряды, отнесенного к высоте гряды L/h , от ее крутизны h/λ (см. рис. 4) и от угла ее тылового склона α_1 (см. рис. 12);
- зависимость смоченного периметра гряды, отнесенного к длине гряды L/λ , от крутизны гряды h/λ (см. рис. 7) и от угла ее тылового склона α_1 (см. рис. 10);
- зависимость *крутизны гряды* h/λ от коэффициента асимметрии k (см. рис. 5, а) и от угла тылового склона гряды α_1 (см. рис. 5, б);
- зависимости L/L_1 и L/L_2 от угла тылового склона гряды α_1 (см. рис. 11);
- зависимость коэффициента асимметрии гряды k от угла тылового склона α_1 (см. рис. 8);
- зависимость углового показателя асимметрии гряды α_1/α_2 от угла тылового склона α_1 (см. рис. 9).

Для получения более точных количественных оценок некоторых рассчитанных параметров их значения в диапазонах наиболее частых значений аргументов приведены в табличной форме. Выведенные в данной работе зависимости могут служить материалом для приблизительной оценки значений некоторых показателей, используемых в исследованиях по речной гидравлике и русловому процессу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Г. Л. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
2. Scheiber L. The influence of geometric definitions on dune characteristics / L. Scheiber, A. Lefebvre // MARID VII. Seventh International Conference on Marine and River Dune Dynamics. Rennes, France, 3–5 April 2023. — 2023. — Pp. 293–297.
3. Gutierrez R. R. Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Río Paraná, Argentina / R. R. Gutierrez, J. D. Abad, D. R. Parsons, J. L. Best // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. — 2013. — Vol. 118. — Is. 3. — Pp. 1400–1418. DOI:10.1002/jgrf.20102.
4. Van Rijn L. C. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness / L. C. Van Rijn // Journal of hydraulic engineering. — 1984. — Vol. 110. — No. 12. — Pp. 1733–1754. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).
5. Знаменская Н. С. Грядовое движение наносов. Теория и практические приложения / Н. С. Знаменская. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. — 188 с.
6. Cisneros J. Dunes in the world's big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape / J. Cisneros, J. Best, T. van Dijk, R. P. D. Almeida, M. Amsler, J. Boldt, B. Frietas, C. Galeazzi, R. Huizinga, M. Ianniruberto, H. Ma, J. Nittrouer, K. Oberg, O. Orfeo, D. Parsons, R. Szupiany, P. Wang, Y. Zhang // Nature Geoscience. — 2020. — Vol. 13. — Is. 2. — Pp. 156–162. DOI: 10.1038/s41561-019-0511-7.

7. Барышников Н. Б. Динамика русловых потоков / Н. Б. Барышников. — СПб.: изд. РГГМУ, 2007. — 314 с.
8. Shinohara K. On the Characteristics of Sand Waves Formed upon Beds of the Open Channels and Rivers / K. Shinohara, T. Tsubaki // Reports of Research Institute for Applied Mechanics. — 1959. — Vol. VII. — No. 25. — Pp. 15–45.
9. Swart D. H. Predictive equations regarding coastal transports / D. H. Swart // Proceedings of the Fifteenth Conference on Coastal Engineering. — American Society of Civil Engineers, 1976. — Vol. II. — Pp. 1113–1132. DOI: 10.1061/9780872620834.066.
10. Lefebvre A. Characterising natural bedform morphology and its influence on flow / A. Lefebvre, A. J. Paarlberg, C. Winter // Geo-marine letters. — 2016. — Vol. 36. — Pp. 379–393. DOI: 10.1007/s00367-016-0455-5.
11. Wu S. Riverbed dune morphology of the Lowermost Mississippi River—Implications of leeside slope, flow resistance and bedload transport in a large alluvial river / S. Wu, Y. J. Xu, B. Wang, H. Cheng // Geomorphology. — 2021. — Vol. 385. — Pp. 107733. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107733.

REFERENCES

1. Gladkov, Gennadii L. and Pachom V. Beljakov. “Sediment transport in rivers: dependence of the dunes parameters on the determining factors.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
2. Scheiber, L., and A. Lefebvre. “The influence of geometric definitions on dune characteristics.” *MARID VII. Seventh International Conference on Marine and River Dune Dynamics. Rennes, France, 3–5 April 2023*. 2023. 293–297.
3. Gutierrez, Ronald R., Jorge D. Abad, Daniel R. Parsons, and James L. Best. “Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Río Paraná, Argentina.” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118.3 (2013): 1400–1418. DOI: 10.1002/jgrf.20102.
4. Van Rijn, Leo C. “Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness.” *Journal of hydraulic engineering* 110.12 (1984): 1733–1754. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).
5. Znamenskaya, N. S. *Gryadovoe dvizhenie nanosov. Teoriya i prakticheskie prilozheniya*. L.: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1968.
6. Cisneros, Julia, Jim Best, Thaienne van Dijk, Renato Paes de Almeida, Mario Amsler, Justin Boldt, Bernardo Frietas, Cristiano Galeazzi, Rick Huizinga, Marco Ianniruberto, Hongbo Ma, Jeff Nittrouer, Kevin Oberg, Oscar Orfeo, Dan Parsons, Ricardo Szupiany, Ping Wang, and Yuanfeng Zhang. “Dunes in the world's big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape.” *Nature Geoscience* 13.2 (2020): 156–162. DOI: 10.1038/s41561-019-0511-7.
7. Baryshnikov, N. B. *Dinamika ruslovykh potokov*. SPb.: izd. RGGMU, 2007.
8. Shinohara, Kinji, and Toichiro Tsubaki. “On the characteristics of sand waves formed upon the beds of the open channels and rivers.” *Reports of Research Institute for Applied Mechanics* 7.25 (1959): 15–45.
9. Swart, Dirk H. “Predictive equations regarding coastal transports.” *Proceedings of the Fifteenth Conference on Coastal Engineering*. Vol. II. American Society of Civil Engineers, 1976. Pp. 1113–1132. DOI: 10.1061/9780872620834.066.
10. Lefebvre, Alice, Andries J. Paarlberg, and Christian Winter. “Characterising natural bedform morphology and its influence on flow.” *Geo-marine letters* 36 (2016): 379–393. DOI: 10.1007/s00367-016-0455-5.
11. Wu, Shuaihu, Y. Jun Xu, Bo Wang, and Heqin Cheng. “Riverbed dune morphology of the Lowermost Mississippi River—Implications of leeside slope, flow resistance and bedload transport in a large alluvial river.” *Geomorphology* 385 (2021): 107733. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107733.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Замышляев Виталий Иванович —
кандидат технических наук
ФГБУ «Государственный гидрологический
институт»
199004, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
2-я линия В.О., д. 23
e-mail: viza51@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zamyshlyayev, Vitaly I. —
PhD
State Hydrological Institute
23 2nd line of Vasilyevsky Island,
St. Petersburg, 199004,
Russian Federation
e-mail: viza51@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2024 г.

Received: April 3, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-251-258

ANALYSIS OF THE NEURAL NETWORK APPLICATION EFFECTIVENESS IN PREDICTING COLLISION AVOIDANCE MANEUVERS FOR TWO VESSELS

O. Y. Tripolets

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

The effectiveness of using neural networks to determine collision avoidance maneuvers between two vessels is analyzed in the paper. A brief description of the algorithm and MATLAB script that facilitates finding course alterations to prevent collisions between pairs of vessels is provided. The process of creating training data using a previously developed script, including the preliminary data processing to eliminate unrealistic scenarios of vessel approach, as well as situations where there is no risk of collision, is described. The neural networks are trained using Levenberg-Marquardt and Adam algorithms. Throughout the study, 11 neural networks with various parameters are trained. The one that allows predicting course changes for safe distance avoidance for pairs of vessels with an accuracy of 94.8 % is selected. The accuracy of the neural networks predictions in this study is defined as the number of initially dangerously approaching vessel pairs whose closest point of approach after being processed by the neural network is within 0.8 to 1.2 miles, divided by the total number of vessel pairs. The time spent on calculating avoidance maneuvers using the algorithm and the neural network is compared. It is shown that as the number of dangerously approaching vessels increases to four or more, the neural network takes five times less time to predict an avoidance maneuver than the algorithm. With an increasing number of dangerously approaching vessels, the gap in data processing time between the neural network and the algorithm widens, which confirms the appropriateness of using neural networks in processing large data sets with pairs of dangerously approaching vessels. Future research is aimed at developing an algorithm to address the challenge of calculating safe collision avoidance maneuvers for groups of vessels through pairwise analysis of collision risks.

Keywords: collision avoidance, closest point of approach, CPA, neural networks, MATLAB, VTS, unmanned systems, maritime transportation

For citation:

Tripolets, Oleg Y. "Analysis of the neural network application effectiveness in predicting collision avoidance maneuvers for two vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 251–258. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-251-258.

УДК 656.61.052

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ МАНЕВРОВ РАСХОЖДЕНИЯ ДВУХ СУДОВ

О. Ю. Триполец

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

В данной статье проанализирована эффективность использования нейронной сети для определения маневров расхождения двух судов. Дано краткое описание алгоритма и скрипта MATLAB, позволяющего находить изменения курсов для предотвращения столкновений пар судов. Описывается процесс создания обучающей выборки с помощью ранее разработанного скрипта, включающий предварительную обработку данных для устранения нереалистичных сценариев сближения пар судов, а также ситуаций, в которых отсутствует опасность столкновения. Обучение нейронных сетей выполнялось с помощью алгоритмов оптимизации Левенберга – Марквардта и Adam. В ходе исследования было обучено одиннадцать нейронных сетей с различными параметрами, из которых выбрана сеть, позволяющая прогнозировать изменения курсов для расхождения на безопасной дистанции для пар судов с точностью 94,8 % (точность прогнозов нейронной сети в данном исследовании определена как количество пар изначально опасно сближающихся судов, дистанция кратчайшего сближения которых после обработки нейронной сетью находилась в пределах 0,8–1,2 мили, поделенной на общее количество пар судов). В исследовании выполнено сравнение времени,

затраченного на вычисление маневров расхождения с использованием алгоритма и нейронной сети. Исследование показало, что при увеличении количества опасно сближающихся судов до четырех и выше нейронная сеть затрачивает на прогнозирование маневра расхождения в пять раз меньше времени, чем алгоритм. С увеличением числа опасно сближающихся судов разрыв во времени обработки данных между нейронной сетью и алгоритмом увеличивается, что подтверждает целесообразность применения нейронных сетей в обработке больших массивов данных с парами опасно сближающихся судов. В дальнейших исследованиях планируется создать алгоритм для решения задачи безопасного расхождения группы судов, осуществляемого на основе попарного анализа опасности столкновений.

Ключевые слова: предотвращение столкновений, дистанция кратчайшего сближения, нейронные сети, MATLAB, СУДС, морские перевозки, беспилотные системы, морские перевозки, беспилотные системы.

Для цитирования:

Триполец О. Ю. Анализ эффективности применения нейронной сети в прогнозировании маневров расхождения двух судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 251–258. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-251-258.

Введение (Introduction)

С увеличением объемов морских перевозок возрастает сложность навигации, особенно в плотно загруженных акваториях. Для уменьшения влияния человеческого фактора, а также оптимизации расходов и увеличения эффективности работы флота разработки беспилотных систем и методов автоматического расхождения судов в море вызывают особый интерес [1], [2]. С развитием технологий и искусственного интеллекта решение многих задач в различных областях науки все чаще доверяют нейронным сетям. Так, нейронные сети (далее — НС) используются для решения задач прогнозирования чрезвычайных ситуаций, а также в биологии, экономике, медицине и других областях науки. Преимущества использования нейронных сетей по сравнению с традиционными алгоритмами описано в работе [3], авторы которой пришли к выводу, что нейронные сети имеют значительные преимущества по сравнению с традиционными алгоритмами благодаря их гибкости, способности к обучению и высокой производительности при решении различных задач. Подобные выводы сделали также авторы статьи [4], добавив к преимуществам НС возможность обработки нескольких потоков информации одновременно, устойчивость к входным помехам и адаптивность к изменениям окружающей среды. Такая универсальность нейронных сетей также находит применение в более специализированных областях, например, в управлении морским трафиком. В исследовании [5] для создания системы предотвращения столкновений судов в море авторы использовали ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) — тип искусственной нейронной сети, основанный на нечеткой логике, для создания системы, способной к обучению и адаптации. При этом следует отметить, что интеграция нейронных сетей и нечеткой логики может повысить безопасность морского движения за счет улучшения систем предотвращения столкновений.

После рассмотрения общих преимуществ нейронных сетей в морской безопасности важно также изучить специфические методы и системы управления, которые могут оптимизировать процесс предотвращения столкновений. Опасность столкновения между судами возрастает с увеличением их числа в определенной морской зоне. Для регулирования морского движения может применяться система управления движением судов (СУДС), задачей которой является координация движения в зоне ее действия. СУДС анализирует позиции, направления и скорости судов, рассчитывает дистанцию кратчайшего сближения и корректирует их маршруты. Авторами статьи [6] выполнены исследование и анализ методов и систем управления для предотвращения столкновений судов в условиях плотного морского трафика. Вычисление оптимальных маневров для предотвращения столкновений судов предлагается выполнять при помощи метода оптимальных дискретных процессов, а управление динамической системой предлагается доверить «внешнему управленцу», например, СУДС. В одном из подходов, описанных в исследовании [7], отмечаются достоинства внешнего управления судами (при помощи СУДС) и перспективы его применения

для предотвращения столкновений двух опасно сближающихся судов, особенно в районах плавания с интенсивным движением.

В настоящее время отсутствуют исследования, в которых рассматривается возможность использования СУДС нейронных сетей для прогнозирования маневров расхождения двух судов в акватории. Описанный в данной статье метод позволяет решить задачу нахождения маневра для безопасного расхождения пары судов под внешним контролем с помощью нейронных сетей. Обученные в рамках данной работы нейронные сети позволяют прогнозировать изменения курсов для безопасного расхождения двух судов в заданной акватории. Данное исследование направлено на анализ эффективности использования нейросетей для прогнозирования маневров расхождения двух судов, в нем выполнено сравнение двух подходов для прогнозирования маневров расхождения: с использованием нейросетей и с использованием алгоритма и формул.

Целью исследования является оценка масштабируемости и быстродействия указанных двух подходов в контексте увеличения числа судов в акватории. В статье описывается сравнительный анализ быстродействия вычислений, проведенных с использованием алгоритма и нейросетей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В [8] разработан метод для определения безопасных маневров расхождения двух беспилотных судов, основанный на уменьшении значения функции стоимости (Cost Function), а также описан скрипт, созданный в программной среде MATLAB, который способен рассчитывать маневр для предотвращения столкновения между судами. Данный скрипт анализирует информацию об опасно сближающихся судах и определяет наиболее подходящее изменение их скоростей и / или курсов, чтобы обеспечить расхождение на заданной безопасной дистанции. Проведенные в программной среде MATLAB симуляции показали эффективность алгоритма вычисления безопасных маневров. Эти метод и скрипт были использованы для создания обучающих данных для нейронной сети, описываемой в данном исследовании.

В программной среде MATLAB функция `fmincon` (сокр. от англ. Find Minimum of Constrained Nonlinear Multivariable Function) — функция, предназначенная для нахождения минимума ограниченной функции нескольких переменных, используемая в оптимизационных задачах, где ее необходимо минимизировать при определенных ограничениях. В описываемом здесь скрипте целевая функция определена как функция стоимости, которая измеряет квадрат разницы между желаемой дистанцией кратчайшего сближения (далее — CPA (Closest Point of Approach)) и рассчитанной CPA. Функция `fmincon` используется для минимизации целевой функции, т. е. для нахождения оптимального изменения курса и скорости судов, которые предотвращают опасность столкновения и увеличивают CPA до заданного (или выше). В работе были установлены следующие ограничения: суда не могут изменять свой курс более, чем на 60 град., оба судна могут маневрировать путем изменения курса. Возможно маневрирование курсом как вправо, так и влево, что будет являться оптимальным маневром для предотвращения столкновения.

Для сравнения эффективности и скорости вычислений, выполненных с помощью алгоритма и нейросетей, метод расчета маневров расхождения из работы [8] было решено упростить с целью ускорения обучения нейронных сетей — в условиях данной работы алгоритм позволял судам маневрировать только изменением курсов. Скрипт для расчета маневров, обеспечивающих безопасное расхождение, получает на вход данные о двух судах: их координаты по осям x и y , курсы и скорости — всего восемь входных элементов в каждом столбце, составляющих матрицу X , каждый столбец которой соответствует одной ситуации движения пары судов. Для каждой пары судов расчет CPA и времени до ее наступления (далее — ТСРА (Time to Closest Point of Approach)). Зная CPA и ТСРА для всех пар судов из матрицы X , алгоритм вычисляет маневры для двух судов, необходимые для предотвращения столкновения.

В описываемом скрипте были установлены следующие условия: если CPA больше безопасной дистанции (задается пользователем), то расчет маневра расхождения не производится. Если CPA меньше безопасной дистанции, но ТСРА больше опасного ТСРА (задается пользователем), то расчет

маневра расхождения не производится. В случае если СРА меньше безопасной дистанции и ТСРА меньше опасного ТСРА, то выполняется расчет маневра расхождения судов. После вычисления маневров для n -количества пар судов формируется матрица $X_adjusted$, содержащая данные о парах судов, среди которых нет опасно сближающихся, т. е. содержащая данные о парах судов, расходящихся на безопасных дистанциях.

Формирование набора учебных данных выполнялось следующим образом: сначала создавалась матрица X , содержащая 1000000 образцов. Значения координаты задавались случайно из интервала $[-20; 20]$, курсы — из интервала $[0; 360]$ град. (в алгоритме выполняется перевод градусов в радианы), скорости из интервала $[1; 20]$ уз. Далее производилась проверка дистанций между сгенерированными судами в матрице X в целях обеспечения для них возможности маневрирования для предотвращения столкновений, а также во избежание ситуации, когда суда находятся изначально «друг на друге». Для этого в компьютерной среде MATLAB был написан скрипт, рассчитывающий изначальные дистанции между судами в парах из матрицы X .

Координаты пар, в которых суда находятся на расстоянии менее 3 миль друг от друга, изменяются в данном скрипте случайным образом до тех пор, пока дистанция между ними не достигнет 3 мили или более. Теперь матрица X , «обработанная» таким скриптом, не содержит судов, находящихся на недостаточном расстоянии друг от друга, так же, как и в действительности СУДС обнаруживает сближение судов заблаговременно, используя данные с АИС и радаров. Затем в процессе исследования формировалась матрица, содержащая только опасно сближающиеся суда. Написанный для этого скрипт MATLAB вычислял СРА и ТСРА между судами и оставлял в матрице X только те пары, в которых присутствовала опасность столкновения ($СРА < 1$ мили, $ТСРА < 30$ мин). Из каждого миллиона случайно сгенерированных образцов примерно 60 тыс. пар судов имели *ситуацию опасного сближения*. Описанные ранее шаги повторялись до тех пор, пока матрица X не наполнилась 563 435 образцами опасно сближающихся судов.

Далее матрица X была обработана с помощью алгоритма, расчета оптимальных маневров для пар судов в матрицу $X_adjusted$, из которой была сформирована (выделена) матрица Y для обучения сети, содержащая только данные о новых (безопасных) курсах судов. Проверка СРА для пар судов, обработанных ранее описанным алгоритмом, показала, что маневры, выбираемые программой, полностью удовлетворяют требованию о том, что *опасная ситуация сближения двух судов становится неопасной*. Таким образом, была создана обучающая выборка для НС — 563435 образцов, содержащая восемь параметров на вход нейросети (Input Data — матрица X) и по два соответствующих им выходных параметра (Target Data — матрица Y).

Обучение нейронных сетей прогнозированию безопасного маневра для расхождения двух судов проводилось в программной среде MATLAB. Использовались нейронные сети прямого распространения (Feedforward Neural Networks). Общее количество образцов обучающей выборки было разделено на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении, соответственно, 70 %, 15 % и 15 %. Обучение нейросетей производилось при помощи алгоритмов оптимизации Левенберга – Марквардта и Adam, доступных в среде MATLAB, так как существующие теории аппроксимации для нейронных сетей не содержат конкретных указаний относительно необходимого количества нейронов для достижения определенной степени точности. Вопрос определения количества скрытых нейронов часто решается на основе эмпирического подхода. Несмотря на то, что теоретически одного скрытого слоя достаточно для аппроксимации различных функциональных зависимостей, фактический размер этого слоя (количество нейронов) может оказаться чрезмерно большим для эффективного решения задачи, что может привести к замедлению процесса обучения или даже сделать его невозможным в зависимости от доступных вычислительных ресурсов. Однако для определенных классов функций, подлежащих аппроксимации, использование глубокой архитектуры может обеспечить аналогичную точность, как и более простая структура, однако с меньшим количеством настраиваемых параметров [9], [10]. Это позволит не только ускорить процесс обучения, но и повысить скорость вычислений в режиме реального времени.

Так как при создании обучающей выборки безопасная дистанция была задана равной одной миле, необходимо выявить, сколько образцов будет обработано нейросетью «правильно», т. е. сколько пар судов разойдутся на дистанции, близкой одной миле. Добавим некий «буфер» для контроля результатов: будем считать, что если СРА в паре судов после обработки нейросетью достигает 0,8–1,2 мили, то образец обработан правильно. Таким образом, *точность* в данной статье — это количество пар судов, дистанция кратчайшего сближения которых после обработки НС находится в пределах 0,8–1,2 мили, поделенное на общее количество образцов.

Точность обработки результатов НС проверялась на выборке данных, состоящей из 100000 опасно сближающихся образцов (СРА в парах была менее 1 мили, а ТСРА — менее 30 мин). Последовательность действий при создании тестовой выборки была такой же, как и при создании обучающей выборки, с той лишь разницей, что общее количество образцов в этом случае составило 100 000. Результаты обучения нейронных сетей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обучения нейронных сетей

№ п/п.	Алгоритм оптимизации	Количество скрытых слоев / нейронов в слоях	Функции активации / особенности обучения	Размер mini-batch	Точность
1	Левенберга – Марквардта	3 / 80, 40, 20	Скрытые слои имеют функцию активации tansig. Purelin на выходном слое	–	0,854
2	Adam	3 / 80, 40, 20	Нормализация Rescale-symmetric. Скрытые слои имеют функцию активации tanh	512	0,581
3	Adam	3 / 100, 60, 30	Нормализация Rescale-symmetric. Скрытые слои имеют функцию активации tanh	512	0,73674
4	Adam	3 / 150, 75, 30	Нормализация отсутствует. Скрытые слои имеют функцию активации tanh	512	0,167
5	Adam	4 / 150, 75, 30, 15	Нормализация Rescale-symmetric. Скрытые слои имеют функцию активации tanh	512	0,42691
6	Adam	2 / 80, 60	Нормализация Rescale-symmetric. Скрытые слои имеют функцию активации tanh. Shuffle-never	512	0,268
7	Adam	2 / 160, 80	Нормализация Rescale-symmetric. Скрытые слои имеют функцию активации tanh. Shuffle — every epoch	256	0,443
8	Adam	3 / 160, 80, 40	Нормализация Rescale-symmetric. Скрытые слои имеют функцию активации tanh. Shuffle — every epoch	256	0,421
9	Adam	3 / 160, 100, 60	Нормализация отсутствует. Скрытые слои имеют функцию активации tanh. Shuffle — every epoch. Initial rate — 0,1–10 % каждые пять эпох	256	0,22
10	Левенберга – Марквардта	4 / 160, 80, 40, 20	Скрытые слои имеют функцию активации tansig	–	0,452
11	Левенберга – Марквардта	3 / 100, 50, 25	Скрытые слои имеют функцию активации tansig. Purelin на выходном слое	–	0,94789

Как видно из табл. 1, наибольшую точность показала нейронная сеть под номером 11. В результате обработки тестовой выборки опасно сближающихся судов данной нейросетью 94,8 % изначально опасно сближающихся пар судов разошлись на безопасной дистанции, находящейся в диапазоне 0,8–1,2 мили.

Результаты (Results)

Несмотря на то, что описанная в данной работе нейросеть предполагает расчет маневров расхождения только для двух судов, планируется ее использование для попарного расчета маневров в ситуациях сближения групп судов. При выборе количества образцов, для которых следует производить сравнение быстродействия вычислений по формулам / алгоритмам и с помощью нейросетей, учитывалось возможное количество опасно сближающихся пар судов в акватории. Так как описанный в данной работе алгоритм и НС позволяют обрабатывать суда попарно, ситуации сближения более чем двух судов будут «разбиваться» на общее количество ситуаций сближения (и соответствующих СРА), возможных между всеми судами в данном случае. Количество комбинаций СРА увеличивается с ростом числа судов: для двух судов будет рассчитан один маневр, для четырех судов — шесть, для ста судов наблюдается уже 4950 комбинаций СРА. Выполнять вычисления для большего числа судов не имеет смысла, так как ситуация одновременного опасного сближения более ста судов в одной акватории (зоне ответственности СУДС) маловероятна.

В ходе исследования было выполнено сравнение времени, затраченного на расчет маневров расхождения с помощью НС и алгоритма для различного количества судов. Для каждого цикла вычислений составлялась новая выборка, содержащая только опасно сближающиеся пары судов (для каждой был необходим расчет маневра расхождения). Количество образцов в этих тестовых выборках для различного количества судов равнялось количеству комбинаций СРА (например, для четырех судов — шесть образцов, для восьми — 28 и т. д.). Для сравнения производительности вычисления выполнялись в программной среде MATLAB на одном компьютере последовательно (процессор Intel(R) Core (TM) i5–9300N 2.40GHz). Для фиксации времени, затраченного на вычисления, использовалась функция tic-toc.

Время, затраченное на вычисления маневров расхождения при помощи алгоритма и нейронной сети, согласно количеству судов и соответствующих ему комбинаций СРА, приведено в табл. 2. Чтобы минимизировать элемент случайности при фиксации времени t на вычисления, было принято решение выполнять расчеты каждым методом для каждой выборки трижды, получая t_1, t_2, t_3 для каждого случая, и в табл. 2 вносить среднее арифметическое значение. Данные каждого столбца в таблице заполнялись в соответствии с количеством образцов — комбинаций СРА, которые необходимо обработать при заданном количестве опасно сближающихся судов в акватории.

Таблица 2

Время, затраченное на вычисления маневров расхождения при помощи алгоритма и нейронной сети для различного количества судов

Количество судов / комбинаций СРА	Время t , затраченное на вычисления	
	Алгоритм, с	Нейронная сеть, с
2 / 1	0,0012	0,0089
4 / 6	0,049	0,0104
8 / 28	0,193	0,0111
10 / 45	0,358	0,0121
15 / 105	0,697	0,0121
20 / 190	1,299	0,0122
25 / 300	2,14	0,0133
50 / 1225	8,62	0,0147
100 / 4950	31,56	0,0271

Как видно из табл. 2, при увеличении опасно сближающихся судов до четырех и более, нейронные сети показывают кратно лучшие результаты в прогнозировании маневра расхождения, чем традиционные методы вычислений: для четырех опасно сближающихся судов НС найдет безопасный маневр в 5 раз быстрее алгоритма, для восьми — в 17 раз, для десяти — в 29 раз, для пятнадцати — в 57 раз, для двадцати — в 106 раз, для двадцати пяти — в 160 раз, для пятидесяти — в 586 раз, для 100 — в 1164 раза.

Быстродействие алгоритма становится недостаточно для одного вычисления в секунду при увеличении числа опасно сближающихся судов в акватории до двадцати: время, необходимое для обработки соответствующего количества комбинаций СРА, составило в данном исследовании 1,299 с. Нейронная сеть успешно справилась с обработкой всех выборок образцов, при этом затратив на прогнозирование безопасных манёвров меньше десятой доли секунды в каждом случае. Таким образом, можно сделать вывод о том, что нейросети демонстрируют лучшую масштабируемость по сравнению с формулами и алгоритмами при прогнозировании маневров расхождения двух судов, т. е. при обработке больших объемов данных они показывают гораздо большую эффективность.

Заключение (Conclusion)

В данной статье выполнено сравнение производительности вычислений маневра расхождения для двух судов с помощью алгоритма и НС. Описан процесс создания обучающей выборки и предварительной обработки данных, во избежание нереалистичных сценариев сближения судов, а также процесс обучения нейронной сети прогнозированию безопасных маневров для расхождения двух судов. Выборка формируется на основе существующего скрипта, написанного на языке MATLAB с учетом различных сценариев сближения судов. Нейронная сеть с наиболее «удачной» архитектурой позволила спрогнозировать маневры, приводящие к расхождению пар судов на дистанции 0,8–1,2 мили, в 94,8 % случаев.

В ходе сравнения была продемонстрирована эффективность НС для прогноза маневров расхождения судов по сравнению с традиционными вычислительными методами. Исследование показало, что при нахождении безопасного маневра для пар судов нейросети обладают высокой скоростью обработки данных, значительно превосходя алгоритм: при четырех опасно сближающихся судах НС прогнозирует маневры расхождения в пять раз быстрее алгоритма и это опережение увеличивается с ростом количества опасно сближающихся судов. Полученные в данной статье результаты подтверждают целесообразность применения нейронных сетей для обработки больших массивов данных и потенциал применения нейронных сетей в обеспечении безопасности судоходства.

В дальнейших исследованиях планируется создать алгоритм, попарно обрабатывающий группу сближающихся судов для совместного маневрирования и расхождения всей группы судов на безопасной дистанции. НС, обученная в данной работе, может быть использована с целью повышения быстродействия этого алгоритма для эффективной работы с большими группами судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang Y. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art / Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R. R. Negenborn, P. H. A. J. M. Van Gelder // *Safety science*. — 2020. — Vol. 121. — Pp. 451–473. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.
2. 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.
3. Головинов А. О. Преимущества нейронных сетей перед традиционными алгоритмами / А. О. Головинов, Е. Н. Климова // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. статей по материалам V Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2017. — С. 11–15.
4. Кононова Н. В. Преимущества нейронных сетей / Н. В. Кононова, Т. И. Авдеева, П. Е. Обласов, И. В. Григорьева // Актуальные проблемы информатизации образования: опыт, проблемы, перспективы развития. Сборник материалов международной научно-практической конференции. — Черкесск: Библиотечно-издательский центр Северо-Кавказской государственной академии, 2020. — С. 91–93.
5. Ahn J. H. A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic / J. H. Ahn, K. P. Rhee, Y. J. You // *Applied Ocean Research*. — 2012. — Vol. 37. — Pp. 162–173. DOI: 10.1016/j.apor.2012.05.008.
6. Бурмака И. А. Управление группой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 1–13.

7. Бурмака И. А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, Г. Е. Калинин, М. А. Кулаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 64–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-64-70.
8. Триполец О. Ю. Расчет маневра расхождения двух безэкипажных судов путем минимизации функции стоимости в компьютерной среде MATLAB / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 876–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884.
9. Mhaskar H. When and why are deep networks better than shallow ones? / H. Mhaskar, Q. Liao, T. Poggio // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. — 2017. — Vol. 31. — No. 1. DOI: 10.1609/aaai.v31i1.10913.
10. Liang S. Why deep neural networks for function approximation? / S. Liang, R. Srikant // 5th International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1610.04161.

REFERENCES

1. Huang, Yamin, Linying Chen, Pengfei Chen, Rudy R. Negenborn, and P.H.A.J.M. van Gelder. “Ship collision avoidance methods: State-of-the-art.” *Safety science* 121 (2020): 451–473. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.
2. Tripolets, Oleg Y. “Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
3. Golovinov, A., and E. Klimova. “Advantages of neural networks before traditional algorithms.” *Ekspertimetal'nye i teoreticheskie issledovaniya v sovremennoi nauke*. Novosibirsk: Assotsiatsiya nauchnykh sotrudnikov «Sibirskaya akademicheskaya kniga», 2017. 11–15.
4. Kononova, N. V., T. I. Avdeeva, P. E. Oblasov, and I. V. Grigorieva. “Advantages of neural networks.” *Aktual'nye problemy informatizatsii obrazovaniya: opyt, problemy, perspektivy razvitiya*. Cherkessk: Bibliotechno-izdatel'skii tsentr Severo-Kavkazskoi gosudarstvennoi akademii, 2020. 91–93.
5. Ahn, Jin-Hyeong, Key-Pyo Rhee, and Young-Jun You. “A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic.” *Applied Ocean Research* 37 (2012): 162–173. DOI: 10.1016/j.apor.2012.05.008
6. Burmaka, I. A., and A. Yu. Bulgakov. “Management of the group of vessel in the situation of dangerous approach.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 1–13.
7. Burmaka, I. A., G. E. Kalinichenko, and M. A. Kulakov. “Management by pair of vessels in situation of dangerous rapprochement.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 64–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-64-70.
8. Tripolets, Oleg Y. “Calculating a collision avoidance maneuver for two unmanned ships by minimizing a cost function in MATLAB.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 876–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884.
9. Mhaskar, Hrushikesh, Qianli Liao, and Tomaso Poggio. “When and why are deep networks better than shallow ones?” *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. Vol. 31. No. 1. 2017. DOI: 10.1609/aaai.v31i1.10913.
10. Liang, Shiyu, and Rayadurgam Srikant. “Why deep neural networks for function approximation?” *5th International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1610.04161.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Триполец Олег Юрьевич — аспирант
Научный руководитель:
Дерябин Виктор Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: tripolets.97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tripolets, Oleg Y. — Postgraduate
Supervisor:
Deryabin, Viktor V. — Dr. of Technical Sciences,
associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: tripolets.97@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 марта 2024 г.
Received: March 4, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270

OVERVIEW OF CURRENT ALGORITHMS FOR AUTONOMOUS VESSELS ROUTE OPTIMIZATION

A. A. Chabak

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

An overview of multiple current algorithms for optimizing the routes of autonomous surface vessels is provided in the paper. One of the effective methods for route optimization is the implementation of algorithms and software based on graph theory to prevent collisions. Key algorithms include Dijkstra's algorithm, A, artificial potential fields, the "dynamic window" method, and the velocity obstacle method. Collision prevention using radar of the maritime autonomous navigation vessel, geometric vessel factors, genetic algorithms, neural network training is also separately discussed. While most algorithms are only considered theoretically, some works describe practical observations: neural networks using deep learning, Markov decision processes, Q-learning; developed autonomous collision avoidance system; heuristic search for optimal ship routes using the A2015 algorithm. Overall research analysis shows that many authors have made significant progress in their work, but the topic is not fully explored. Some works do not consider divergence with multiple vessels, while others do not utilize maneuvers involving speed changes. Certain works face challenges in parameter tuning for algorithm efficiency. The optimality criterion for multiple maneuvering, considering factors beyond minimizing the closest point of approach to another vessel, such as responsibility distribution for maneuver execution, is not fully developed. It is noted that all necessary conditions for creating a universal algorithm in the future already exist due to modern technologies and the research topic relevance.*

Keywords: autonomous navigation, unmanned surface vessels, route optimization, collision avoidance, path planning, current algorithms.

For citation:

Chabak, Artem A. "Overview of current algorithms for autonomous vessels route optimization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 259–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270.

УДК 656.61.052

ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ПО ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ АВТОНОМНЫХ СУДОВ

А. А. Чабак

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

В статье выполнен обзор различных алгоритмов по оптимизации маршрутов морских автономных надводных судов. Отмечается, что актуальным и действенным методом оптимизации маршрутов является внедрение алгоритмов и программной базы по предотвращению столкновения, основанных на теории графов. Основными способами являются алгоритм Дейкстры, A, искусственные потенциальные поля, метод «динамического окна», метод скоростного препятствия. Также отдельно рассматривается предотвращение столкновения с использованием радара морского автономного навигационного судна, геометрических факторов судов, генетического алгоритма, обучения нейронной сети. При этом большинство алгоритмов рассматривается только как теоретическое решение поставленных задач. Вместе с тем в некоторых работах описаны результаты, полученные при проведении экспериментальных натурных испытаний, а именно: нейронные сети, использующие глубокое обучение, марковский процесс принятия решений, Q-обучение; созданная с нуля система автономного предотвращения столкновения с использованием концепции поиска заменяемого пространства действий; эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути с использованием алгоритма A2015. Общий анализ исследований показал, что многие авторы значительно продвинулись в своих исследованиях — в них видна положитель-*

ная динамика исследования, однако необходимо совершенствовать существующие алгоритмы для решения поставленных задач, поскольку в одних работах не рассматривается расхождение с несколькими судами, в других не используется маневр, связанный с изменением скорости, в отдельных работах существует сложность настройки параметров для эффективной работы алгоритма. Не в полной мере разработан также критерий оптимальности при совместном маневрировании, учитывающий не только обеспечение минимального значения кратчайшей дистанции до судна в системе, но и другие факторы, такие как распределение обязанностей по выполнению маневров судов.

Ключевые слова: автономная навигация, безэкипажные суда, оптимизация маршрутов, предотвращение столкновений, планирование маршрута, актуальные алгоритмы.

Для цитирования:

Чабак А. А. Обзор актуальных алгоритмов по оптимизации маршрутов автономных судов / А. А. Чабак // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 259–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270.

Введение (Introduction)

Современное мореплавание переживает период значительных трансформаций благодаря автономным судам, обладающим способностью самостоятельно принимать решения и управлять маршрутами без непрерывного участия человека. Эти инновационные технологии не только могут повысить эффективность и экономическую выгоду морской индустрии, но также внести значительный вклад в обеспечение безопасности судоходства и снижение отрицательного воздействия на окружающую среду.

Главным аспектом успешного функционирования автономных судов является *оптимизация их маршрутов* — сложная и многогранная научная проблема, объединяющая различные факторы, начиная с экономических выгод и безопасности плавания и заканчивая использованием ограниченных ресурсов и соблюдением руководств. Существует множество подходов к решению задачи совместного маневрирования группы автономных судов при возникновении опасности столкновения. В 2017 г. Международная морская организация (ИМО) приняла решение о включении термина «морское автономное надводное судно» (МАНС) в рассмотрение проблем навигации для таких судов [1]. С тех пор методы для предотвращения столкновения [2] и оптимизации маршрута рассматривались отдельно. Совместная задача универсального, удовлетворяющего современным реалиям навигации и перевозки грузов, выбора пока еще не решена.

Актуальным и действенным методом оптимизации маршрутов является внедрение алгоритмов и программной базы по предотвращению столкновения, основанных на теории графов, описываемых в источниках [3]–[5]. Основными алгоритмами являются алгоритм Дейкстры, A* (A-star), искусственные потенциальные поля (Artificial Potential Fields (APF)), метод «динамического окна» (Dynamic Window Approach (DWA)), метод скоростного препятствия (Velocity Obstacle (VO)). Также отдельно рассматриваются предотвращение столкновения с использованием только радара МАНС [6], геометрические факторы судов [7], генетический алгоритм [8] и обучение нейронной сети [9].

Разнообразие вариантов подхода к решению задачи оптимизации заключается в сложности реализации программного обеспечения с учетом следующих факторов:

- критерий оптимальности при совместном маневрировании, т. е. учитывающий не только обеспечение минимального значения кратчайшей дистанции до судна в системе, но и другие факторы, например, распределение обязанностей по выполнению маневров судов:

- «Международные правила предупреждения столкновения судов в море (МППСС-72)» (Правила МППСС-72);

- потенциальные статические и динамические препятствия;
- кратчайшая дистанция и время до столкновения;
- учет ветра, течений и других гидродинамических условий;
- обход опасных для навигации зон.

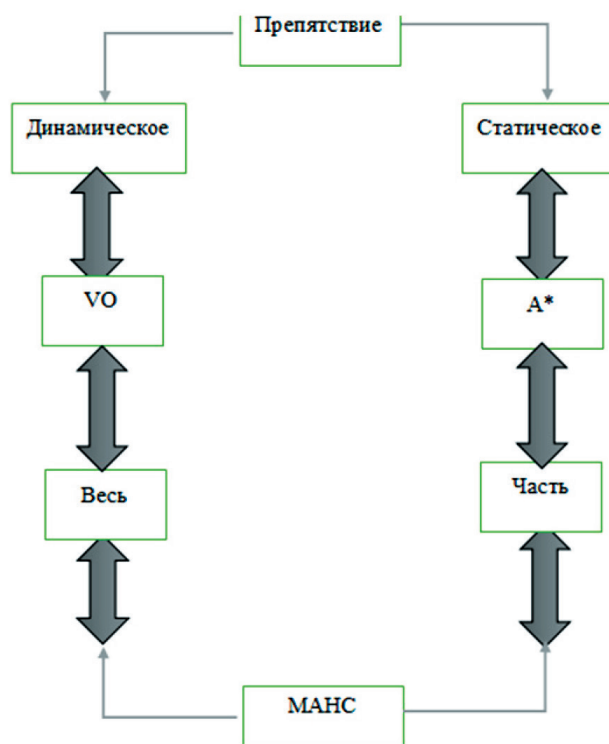
Целью данного исследования является обзор различных существующих методов оптимизации маршрутов автономных судов с позиции предотвращения столкновения.

Задачи данной работы:

- рассмотреть существующие методы расхождения автономных судов с динамическими и статическими препятствиями: другие суда, плавучие буи, маяки, рыболовные сети и т. п.;
- определить, какие из них наиболее полно описывают решение задачи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В исследовании [10] для обеспечения безопасности автономной навигации морского автономного навигационного судна исследуется предотвращение столкновения как со статическими объектами, так и с динамическими. В зависимости от этого выбирают алгоритм A^* или метод скоростного препятствия. Общая концепция столкновения приведена на схеме при планировании маршрута МАНС. Согласно глобальной информации по навигационной области предотвратить столкновение со статическим препятствием проще, изменив только часть маршрута, в то время как после маневра с динамическим препятствием морская обстановка может значительно измениться и необходимо будет менять маршрут целиком. Расположение в исходно запланированном пути может являться непроходимой зоной из-за вторжения динамического препятствия. В этой ситуации используется *метод скоростного препятствия* для завершения маневра.



Однако из-за возможных непредсказуемых рисков во время маневра возникают сложности, вызванные необходимостью гарантировать результативность алгоритма скоростного препятствия в реальных условиях. В связи с этим в алгоритм скоростного препятствия вносят изменения для обеспечения надежности. Возможные варианты таких изменений описаны в статьях [11]–[16]. В исследовании [11] метод скоростного препятствия рассматривают как модель электрического поля, используя для выделения силы влияния предотвращения столкновения в модели поля скорости гауссовское распределение. В статье [12] отмечается, что преимущественно необходимо изменять курс судна, а не скорость. Алгоритм работает на базе изучения скоростных конусов судна при условии, что скорость МАНС не будет изменяться. Сравнивают текущую скорость судна и скоростной конус препятствия для расчетов безопасных курсов, на которые может лечь судно для предотвращения столкновения. В публикации [13] основная идея заключается в улучшении пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора для следования судна по треку в целях компенсации возможных отклонений результатов алгоритма скоростного препятствия.

В исследовании [17] предложены улучшенный алгоритм A^* для планирования пути МАНС и улучшенный *метод динамического окна* (IDWA) для предотвращения столкновений. Сначала, с учетом требований МППСС-72, область поиска была заново подвергнута проверке, уменьшено количество путей МАНС. Затем был внедрен улучшенный алгоритм A^* в целях предоставления возможности МАНС избежать статических препятствий и достичь своего пункта назначения без попадания под местную оптимизацию. Кроме того, для обучения весовых коэффициентов целевой функции IDWA использовался метод сети Деер Q. Таким образом, улучшенный алгоритм создания маршрута во время предотвращения столкновения является наиболее безопасным и рациональным. Для проверки выполнения предложенного алгоритма планирования пути было проведено сравнительное экспериментальное исследование с использованием традиционного *метода динамического окна* (DWA). Чтобы гарантировать возможность рассмотрения только безопасных траекторий для создания пространства поиска скорости в 2D для планирования пути МАНС и принятия решений о предотвращении столкновений, алгоритм DWA учитывает только траектории, определенные скоростными векторами, приемлемыми для МАНС. Следовательно, в источнике рассматриваются следующие ограничения приемлемых скоростей в соответствии с характеристиками динамики МАНС и окружающей навигационной средой:

1. МАНС ограничивается своей собственной максимальной скоростью и угловой скоростью. Пространство поиска может быть уменьшено ограничениями на приемлемые скорости.

2. МАНС подвергается воздействию характеристик механической системы управления движением из-за ограничения тяги винта и механизмов управления рулем МАНС имеет максимальное ускорение и максимальное замедление. С учетом ограниченного ускорения и замедления общее пространство поиска скорости может быть уменьшено до скоростей, достижимых в определенном временном интервале.

3. Для того чтобы позволить МАНС остановиться перед столкновением с препятствием, установленные ограничения допустимых скоростей должны быть рассчитаны.

С учетом указанных ограничений для пространства поиска скоростей МАНС более рациональное приемлемое пространство скоростей может определить полученное пространство поиска приемлемых скоростей МАНС. Учитывая пространство приемлемых скоростей МАНС, можно создать бесчисленное множество возможных траекторий МАНС с использованием полученного пространства поиска скоростей. Целевая функция курса определяется для измерения соответствия направления движения МАНС направлению на цель. Когда направление движения МАНС полностью указывает на целевую точку, значение этой функции является максимальным. Функция скорости представляет собой прямое проецирование скорости МАНС для ее оценки на соответствующей траектории. Если линейная скорость судна выше в следующий момент времени, то достигается более высокое значение функции. С учетом критериев направления на цель расстояния до ближайших препятствий и продольной скорости можно определить максимум целевой функции в приемлемом пространстве. Однако следующие *слабые места*, связанные с исходным методом DWA, требуют внимания:

- при движении рядом с судами МАНС должен получать рекомендации по предотвращению столкновений в соответствии с МППСС-72;
- несмотря на то, что метод DWA использует целевую функцию для выбора оптимальных команд скорости МАНС, коэффициенты веса целевой функции должны быть выбраны рационально с учетом критерия оптимальности.

В статье [18] также рассматривается улучшенный *метод динамического окна* (IDWA), однако помимо этого предлагается алгоритм местного планирования маршрута на основе *трехступенчатой стратегии избегания столкновений*, соответствующей тому, что движущееся судно находится далеко, движущее судно находится близко, но при этом риск столкновения низкий, а также судно находится близко и существует опасность столкновения. На первой ступени предложена область маневрирования, во избежание динамического препятствия, и улучшенный *метод динамического окна*, а также включается окружающее воздействие для повышения эффективности маневра и уменьшения расхода топлива. На второй и третьей ступенях метод скоростного

препятствия и МППСС-72 объединены. Для выбора оптимальной динамической целевой точки введено ограничение метода скоростного препятствия на второй ступени, на третьей существует ограничение по изменению курса влево и механизм оценки по изменению курса вправо для расчета динамических целевых точек в соответствии с МППСС-72. Результаты симуляции показывают, что предлагаемая стратегия и алгоритм позволяют избежать статических препятствий и одиночного движущегося судна одновременно.

Особенности использования метода скоростного препятствия:

1. Предлагаемый метод позволяет предотвратить столкновение только с одним судном, а не с несколькими.

2. Рассматривается только часть маршрута, а не весь путь судна.

3. Скорость и плавность возвращения судна на трек нуждается в улучшении.

В исследованиях [19]–[21] предложен метод планирования маршрута для МАНС на основе вероятности столкновения и алгоритма A^* . Сначала были выбраны объекты в канале, такие как сам канал, маяк и причал. Распределение вероятности столкновения описано моделью искусственного потенциального поля (APF — Artificial Potential Field). На основе данных истории АИС получено распределение траекторий на различных участках. Значения параметров в модели APF решаются с помощью нелинейной оптимизации по данным АИС. После получения распределения искусственного потенциального поля оптимальный маршрут находится с помощью алгоритма A^* . Чтобы решить проблему, связанную со сложностью обработки маршрута для распределения вероятности, предложен алгоритм сглаживания на основе регрессионного анализа. Этот алгоритм основан на реальных маршрутах судов и поэтому более надежен. При планировании маршрута также учитывались маневренные характеристики МАНС.

В источнике [22] рассмотрен метод муравьиной колонии для предотвращения столкновения. Суть его заключается в том, что существует область, в которой движутся суда, обозначаемая множеством E , которое делится на подмножество E_{free} , т. е. свободное пространство, и E_{obs} — препятствия. Эти данные МАНС получает, например, с помощью средств автоматической радиолокационной прокладки, после чего выполняется расчет относительной скорости цели, ее курса и пеленга. Помимо этого алгоритм проверяет наличие опасных статических объектов, в итоге составляется граф, в котором инициализируется метод муравьиной колонии. В нем МАНС каждую путевую точку выбирает отдельно, следуя по наиболее благоприятному пути в зависимости от критерия оптимизации. Однако автор уточняет, что маневр изменения скорости не применялся в алгоритме, а также не учитывались изменения скорости и курсов других судов. Такая же проблема рассмотрена в статье [23], автор которой разделил алгоритм на две части: в первой использовал грид-вычисления (или метод сетки) в программной среде MATLAB для моделирования маршрута, во второй поместил МАНС и препятствия на пути этого маршрута для симуляции и проверки эффективности алгоритма. Данный метод заключается в использовании сетки одинакового размера для разделения рабочего пространства МАНС и использовании сетки для представления окружающей среды, где каждая точка имеет одно из двух состояний: свободное пространство или препятствие. Процедура по определению кратчайшего пути следующая:

1. *Матрица смежности на карте.* Вводится матрица, состоящая из 0 и 1, которая указывает на то, что МАНС необходимо найти оптимальный маршрут на карте, где 0 представляет собой доступное местоположение, а 1 — препятствие.

2. *Операции базовых действий сеточного метода в двумерном пространстве.* Алгоритм поиска представляет собой сетку. Предположим, что МАНС в данный момент находится в узле n , поэтому у него есть восемь возможных базовых движений, которым соответствует восемь масштабируемых узлов, обозначенных следующим образом: север (N), северо-восток (NE), восток (E), юго-восток (SE), юг (S), юго-запад (SW), запад (W), северо-запад (NW).

3. *Оценка критерия расстояния.* Начиная с определенной точки, местоположение, которое можно достичь за один шаг, имеет препятствие 0. Для местоположения, которое можно достичь за один шаг, рассчитывается длина его пути с длиной стороны 1.

В итоге алгоритм справляется с оптимизацией маршрута за 40 генераций, но так же, как и в статье [22], не учитываются изменения скорости и курсов других судов. В статье [24] сделана попытка использовать метод сетки для предотвращения столкновения со статическими препятствиями путем формирования подточек на касательном угле препятствия с использованием веса каждого для создания возможных путей. На первом этапе веса препятствий определяются на основе того, являются ли соседние ячейки также препятствиями или нет. Вторым этапом является оптимизация маршрута на основе динамического программирования для нахождения кратчайших путей среди возможных. При использовании динамического программирования глобальная проблема планирования пути разбивается на более простые подзадачи, что позволяет более легко определить и более гибко управлять процессом решения проблем оптимизации. МАНС моделируется уравнениями движения шести степеней свободы с параметрами, определенными на основе физической модели судна. В статье представлены результаты моделирования для демонстрации успешной работы метода. Отдельно отмечается, что из-за ограниченной маневренности МАНС самый короткий путь, полученный с использованием динамического программирования, не всегда является наименьшим пройденным путем и самое кратчайшее расстояние не гарантирует максимально короткого периода в пути.

Авторы исследования [25] предлагают решение проблемы оптимизации при помощи *метода роя частиц*. Данный метод был официально представлен инженером-электриком Р. Эберхартом и социальным психологом Дж. Кеннеди в 1995 г. [26]. Это еще один имитирующий интеллектуальный алгоритм после генетического алгоритма, идея которого возникла на основе изучения поведения птиц, ищущих пути поиска пищи. В нем «объекты» преодолевают пространство поиска для нахождения оптимального положения, которое сводит определенную задачу к максимуму или минимуму. Алгоритм метода роя частиц моделирует характеристики целевой функции со скоростью сходимости, из которых возникает идея решения проблемы, на основе которой данная проблема оптимизируется. В статье предложено использовать метод роя частиц вместе с оптимизацией параметров ПИД регулятора, а также введено понятие оптимального энергопотребления для прокладки маршрута с целью экономии энергии и расхода топлива. Согласно фактическим навигационным требованиям сначала создается математическая модель и модель для избежания столкновений в целях обеспечения безопасной навигации МАНС, в частности предотвращения столкновения с неподвижными препятствиями, затем рассчитываются значения пригодности каждой частицы в области. При этом предполагается, что каждая i -я частица имеет уникальное значение пригодности на каждой итерации, вычисляемой посредством оценки целевой функции. Эти значения сравниваются, и выбирается лучший критерий оптимизации. В итоге, на основе этого критерия выводится оптимальное решение по маршруту, которое также внедряется в ПИД регулятор для того, чтобы понять, сможет ли судно правильно удерживать курс на протяжении всего пути.

В статье [27] описан метод решения проблемы избежания препятствия для безэкипажных судов с применением нейронных сетей и глубокого обучения с подкреплением. Этот метод включает создание соответствующего алгоритма принятия решений во избежание препятствий, называемого DRLOAD (Deep Reinforcement Learning Obstacle Avoidance Decision-Making). В основе данного метода лежит марковский процесс принятия решений. В процессе обучения нейронная сеть использует текущее состояние МАНС как входные данные, таблица значений выполняемых действий Q представлена в качестве выходных данных. Обучение модели поведения достигается путем тренировки соответствующих максимальных значений Q . В зависимости от текущего состояния алгоритм позволяет безэкипажному судну предпринимать соответствующие действия.

Модель среды, в которой тестировался этот метод, представляет собой сеточную карту с двумерным изображением, где каждая точка имеет значение состояния от 0 до 1 (0 — препятствие, 1 — свободное пространство). Важной частью алгоритма является функция вознаграждения за избежание столкновений, которая определяет цель задачи для МАНС. Проведенное тестирование алгоритма DRLOAD в среде MATLAB состояло из двух частей: стремление достичь цели и предотвращение столкновения. В случае, когда в окружении нет препятствий или препятствие

находится на безопасном расстоянии, МАНС корректирует направление к точке маршрута, когда препятствие появляется в пределах безопасного расстояния, безэкипажное судно использует стратегию глубокого обучения для предотвращения столкновения. В итоге результаты моделирования можно считать эффективными как по отношению к статическим объектам, так и к динамическим.

Отдельный алгоритм был создан для эвристического поиска оптимального маршрута судна по Северному морскому пути, описанный в статье [28]. Основной проблемой передвижения по Северному морскому пути является наличие льдов, поэтому выбор наиболее оптимального варианта движения основан на объеме информации о пути, состоянии судна и других факторах. Для создания алгоритма критериями оптимизации были выбраны время перехода по кратчайшему расстоянию в ледовых условиях и положение портов, между которыми выполнялся переход. Эвристический алгоритм A2015 сравнивался с алгоритмом Дейкстры и Флойда – Уоршелла, на основании чего был сделан следующий вывод: разработанный алгоритм позволяет на первом этапе построения маршрута найти приближенные решения и перейти к поиску оптимального маршрута на основе точных алгоритмов, при этом результат достигается за меньшее количество операций при одинаковом числе вершин графа.

Особо следует отметить исследования [29] и [30], в которых описано проведение «живого» эксперимента по предотвращению столкновения четырех МАНС. Для выбора безопасного маршрута используется система автономного предотвращения столкновения (Autonomous Collision Avoidance System (ACAS)) с применением концепции поиска заменяемого пространства действий, в которой пространство может изменяться в зависимости от уровня риска столкновения. Для эффективной оценки риска используется нечеткая логика. ACAS была проверена на прототипе МАНС, ARAGON1 с использованием АИС [30]. Важно было вовремя обнаружить и отследить препятствия для автономного предотвращения столкновений. В качестве основного сенсора использовался импульсный радар. Однако, из-за слепой зоны радара, испытания по обнаружению и отслеживанию препятствий проводились с использованием нескольких сенсоров, таких как электрооптическая камера, инфракрасная камера и Лидар. ACAS была проверена на втором и последнем прототипе МАНС, ARAGON2 и ARAGON3. Испытания в сложных ситуациях столкновений с несколькими судами: судами, идущими друг на друга, пересекающимися судами и при обгоне, проводились с использованием информации о препятствиях из отслеживаемых данных, рассчитанных на основе слияния датчиков. Также в каждом МАНС была установлена система автономной навигации, состоящая из трех основных подсистем для предотвращения столкновений, таких как навигационные датчики в реальном времени (Real-Time Kinematic (RTK)) GPS и интегрированная навигационная система (Integrated Navigation System (INS)), система обнаружения и отслеживания объектов на основе множественных сенсоров (Multiple sensor based Object Detection and Tracking system (MDOT)) и система автономного предотвращения столкновений (ACAS). MODT собирает информацию о препятствиях с использованием слияния данных из автоматической идентификационной системы, импульсного радара, лидара и электрооптической и инфракрасной камеры.

Используя заменяемое пространство действий и опасность столкновения на основе нечеткой логики, ACAS рассчитывает оптимальный маршрут через алгоритм предотвращения столкновений. В конечном итоге автопилот активируется для рассчитываемого маршрута. Каждая подсистема в каждом МАНС работает в режиме реального времени. Группа МАНС обменивается навигационной информацией собственного судна и препятствиями друг с другом через канал связи LTE. В SANS каждое МАНС может управляться автономно или удаленно через канал связи LTE с наземной станцией управления, в которой пользователь может отслеживать и контролировать группу МАНС раздельно или одновременно, используя систему управления и команд на основе электронной навигационной карты. В группе МАНС одно судно рассматривается как препятствие для других автономных судов, поэтому все МАНС должны предпринимать меры по предотвращению столкновения друг с другом, используя навигационную информацию. Испытания показали, что несмотря на то, что метод нуждается в доработке по определению оптимальной кратчайшей дистанции и времени до столкновения, четыре автономных судна смогли разойтись друг с другом,

даже сумев предпринять исключительные действия последнего маневра, такие как поворот влево или сбавление хода.

Заключение (Conclusion)

Оптимизация маршрутов автономных судов — важная и актуальная задача, требующая знаний не только в области мореплавания, но и программирования. Использование передовых систем автоматизации и искусственного интеллекта в навигации позволяет судам принимать обоснованные решения, учитывая различные факторы, такие как погода, трафик, соблюдение международных конвенций. Анализ существующих алгоритмов показал, что авторы исследований решения задачи оптимизации маршрутов и предотвращения столкновения судов в большинстве случаев предлагают использовать алгоритмы, на основе теории графов. Поэтому наиболее популярными алгоритмами являются: A^* , метод скоростных препятствий, метод муравьиной колонии, метод роя частиц. Важное применение на практике получили:

- нейронные сети, использующие глубокое обучение, марковский процесс принятия решений, Q -обучение;

- созданная с нуля система автономного предотвращения столкновения с использованием концепции поиска заменяемого пространства действий;

- эвристический поиск оптимального маршрута судна по СМП, используя алгоритм A2015.

Таким образом, цель данной работы выполнена, решены следующие задачи: рассмотрены существующие методы расхождения автономных судов с различными препятствиями; проанализированы современные алгоритмы по оптимизации маршрутов и определены те из них, которые наиболее полно описывают решение задачи.

Обзор описанных в работе исследований показывает положительную тенденцию проведенной в этом направлении работы, однако в дальнейшем необходимо совершенствование существующих алгоритмов для решения поставленных задач, поскольку в одних исследованиях не рассматривается расхождение с несколькими судами, в других — не используется маневр, связанный с изменением скорости, а в некоторых исследованиях существует сложность настройки параметров для эффективной работы алгоритма. Кроме того, не в полной мере разработан критерий оптимальности при совместном маневрировании, т. е. критерий, учитывающий не только обеспечение минимального значения кратчайшей дистанции до судна в системе, но и другие факторы, например, такие как распределение обязанностей по выполнению маневров судов (судно меньшего тоннажа должно быть более маневренным по сравнению с судном большего тоннажа).

Таким образом, необходимо совершенствовать идеи и алгоритмы, которые устанавливают в «мозг» компьютерной системы автономных судов для улучшения безопасности навигации и оценки риска столкновения, возможности проводить испытания безэкипажных судов не только в каналах или прибрежных условиях, но и в открытом море. В настоящее время еще не существует такого алгоритма, который позволяет решить все существующие проблемы и поставленные задачи для того, чтобы автономные суда могли находиться наравне с другими типами судов, однако на основе изучения многочисленных источников можно прийти к выводу, что существуют все необходимые условия для создания алгоритмов, совместимых в перспективе с разными видами автономных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Autonomous shipping. IMO [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/Media-Centre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (дата обращения 10.02.2024).
2. 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.
3. Bondy J. A. Graph Theory / J. A. Bondy, U.S.R. Murty. — 1st. ed. — Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. — 675 p.
4. Tamm У. Теория графов: Пер. с англ. / У. Татт. — М.: Мир, 1988. — 424 с.

5. Уилсон Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон; перевод с англ. И. Г. Никитиной; под ред. Г. П. Гаврилова. — М.: Мир, 1977. — 208 с.

6. bin Mohamad Rafi M. S. A. Radar-Based Collision Avoidance on Unmanned Surface Vehicles (USV) / M. S. A. bin Mohamad Rafi, W. Sediono, Z. bin Zainal Abidin // 2022 IEEE 9th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). — IEEE, 2022. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/USYS56283.2022.10073415.

7. Mu D. Geometric Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on Multi-objective / D. Mu, T. Li, X. Han, Y. Fan, X. Sun, Y. Liu // 2022 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). — IEEE, 2022. — Pp. 159–165. DOI: 10.1109/ICoIAS56028.2022.9931210.

8. Fu Z. Method for collision avoidance by USV based on improved genetic algorithm / Z. Fu, H. Wang, Y. Gu, C. Li, H. Tong, H. Wang // Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast. — IEEE, 2020. — Pp. 01–06. DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389254.

9. Триполец О. Ю. Обучение нейронной сети вычислению дистанции кратчайшего сближения между судами / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 713–721. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-713-721.

10. Yan H. An Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on A Star and Velocity-Obstacle Algorithms / H. Yan, Q. Zhu, Y. Zhang, Z. Li, X. Du // 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). — IEEE, 2022. — Vol. 6. — Pp. 77–82. DOI:10.1109/ITOEC53115.2022.9734642.

11. Sun X. Real-time collision avoidance control for unmanned surface vehicle based on velocity resolution method / X. Sun, G. Wang, Y. Fan, D. Mu, B. Qiu, J. Liu // 2019 Chinese Control Conference (CCC). — IEEE, 2019. — Pp. 6668–6673. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866486.

12. Zhuang J. Multiple Moving Obstacles Avoidance for USV using Velocity Obstacle Method / J. Zhuang, Y. Zhang, P. Xu, Y. Zhao, J. Luo, S. Song // 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). — IEEE, 2021. — Pp. 140–145. DOI: 10.1109/ICUS52573.2021.9641331.

13. Li Y. Real-time collision avoidance planning for unmanned surface vessels based on field theory / Y. Li, J. Zheng // ISA transactions. — 2020. — Vol. 106. — Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.07.018.

14. Cho Y. Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles / Y. Cho, J. Han, J. Kim, P. Lee, S. B. Park // IFAC-PapersOnLine. — 2019. — Vol. 52. — Is. 21. — Pp. 329–334. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.328.

15. Johansen T. A. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment / T. A. Johansen, T. Perez, A. Cristofaro // IEEE transactions on intelligent transportation systems. — 2016. — Vol. 17. — Is. 12. — Pp. 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.

16. Zhuang J. Collision avoidance for unmanned surface vehicles based on COLREGS / J. Zhuang, J. Luo, Y. Liu, R. Bucknall, H. Sun, C. Huang // 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). — IEEE, 2019. — Pp. 1418–1425. DOI: 10.1109/ICTIS.2019.8883829.

17. Guan W. Autonomous Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles Based on Improved A-Star and Dynamic Window Approach Algorithms / W. Guan, K. Wang // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. — 2023. — Vol. 15. — Is. 3. — Pp. 36–50. DOI:10.1109/MITS.2022.3229109.

18. Wang P. Research on Local Path Planning for Autonomous Collision Avoidance of USV / P. Wang, X. Yao, Q. Fei, J. Meng // 2022 China Automation Congress (CAC) — IEEE, 2022. — Pp. 5368–5373. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10055154.

19. Chao W. A situation awareness approach for USV based on Artificial Potential Fields / W. Chao, M. Feng, W. Qing, W. Shuwu // 2017 4th International conference on Transportation Information and Safety (ICTIS) — IEEE, 2017. — Pp. 232–235. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047770.

20. Chen Q. D. Vector Field-Based Guidance Method for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles / Q. D. Chen, S. W. Huang, M. H. Ho, F. Y. Chung, C. H. Chu, C. M. Liao, J. Guo // 2023 IEEE Underwater Technology (UT). — IEEE, 2023. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/UT49729.2023.10103386.

21. Naeem W. Collision avoidance of maritime vessels / W. Naeem, S. Campbell, M. Abu-Tair // Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles. — 2019. — Pp. 61–84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.

22. Lazarowska A. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimization / A. Lazarowska // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 2. — Pp. 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.

23. Yuan-hui W. Research on Optimal Planning Method of USV for Complex Obstacles / W. Yuan-hui, C. Cen // 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. — IEEE, 2016. — Pp. 2507–2511. DOI:10.1109/ICMA.2016.7558960.
24. Gamayanti N. Global Path Planning for USV Waypoint Guidance System Using Dynamic Programming / N. Gamayanti, R. E. A. Kadir, A. Alkaff // 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). — IEEE, 2020. — Pp. 248–253. DOI: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163712.
25. Ding F. Energy-efficient Path Planning and Control Approach of USV Based on Particle Swarm Optimization / F. Ding, Z. Zhang, M. Fu, Y. Wang, C. Wang // OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. — IEEE, 2018. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604920.
26. Казакова Е. М. Применение метода роя частиц в задачах оптимизации / Е. М. Казакова // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2022. — № 5 (109). — С. 48–57. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-48-57.
27. Wang C. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments / C. Wang, X. Zhang, L. Cong, J. Li, J. Zhang // Evolving Systems. — 2019. — Vol. 10. — Is. 4. — Pp. 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
28. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
29. Son N. S. On the sea trial test for the validation of an autonomous collision avoidance system of unmanned surface vehicle, ARAGON / N. S. Son, S. Y. Kim // OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604803.
30. Son N. S. On an Autonomous Navigation System for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicle / N. S. Son // Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting. — 2013. — Pp. 470–476.

REFERENCES

1. Autonomous shipping. Web. 10 Feb. 2024 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>>.
2. Tripolets, Oleg Y. “Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
3. Bondy, J. A., and U. S. R. Murty. *Graph Theory*. 1st. ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
4. Tutte, W. T. *Graph Theory*. Cambridge University Press, 2001.
5. Wilson, Robin J. *Introduction to Graph Theory*. 5th Edition. Pearson, 2010.
6. bin Mohamad Rafi, Muhammad Shahrul Afiq, Wahju Sediono, and Zulkifli bin Zainal Abidin. “Radar-Based Collision Avoidance on Unmanned Surface Vehicles (USV):” *2022 IEEE 9th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/USYS56283.2022.10073415.
7. Mu, Dongdong, Tanghui Li, Xinjie Han, Yunsheng Fan, Xiaojie Sun, and Yanli Liu. “Geometric Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on Multi-objective.” *2022 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ICoIAS56028.2022.9931210.
8. Fu, Zhongjian, Hongjian Wang, Yingmin Gu, Chengfeng Li, Haiyan Tong, and Haibin Wang. “Method for collision avoidance by USV based on improved genetic algorithm.” *Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389254.
9. Tripolets, Oleg Y. “Training a neural network to calculate the closest point of approach.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 713–721. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-713-721.
10. Yan, Hongzhou, Qige Zhu, Yifan Zhang, Zhe Li, and Xiaojia Du. “An Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on A Star and Velocity-Obstacle Algorithms.” *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. Vol. 6. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734642.
11. Sun, Xiaojie, Guofeng Wang, Yunsheng Fan, Dongdong Mu, Bingbing Qiu, and Jian Liu. “Real-time collision avoidance control for unmanned surface vehicle based on velocity resolution method.” *2019 Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2019. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866486.

12. Zhuang, Jiayuan, Yuhang Zhang, Peihong Xu, Yi Zhao, Jing Luo, and Shengqing Song. "Multiple Moving Obstacles Avoidance for USV using Velocity Obstacle Method." *2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ICUS52573.2021.9641331.
13. Li, Yun, and Jian Zheng. "Real-time collision avoidance planning for unmanned surface vessels based on field theory." *ISA transactions* 106 (2020): 233–242. DOI: 10.1016/j.satra.2020.07.018.
14. Cho, Yonghoon, Jungwook Han, Jinwhan Kim, Philyeob Lee, and Shin-Bae Park. "Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles." *IFAC-PapersOnLine* 52.21 (2019): 329–334. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.328.
15. Johansen, Tor Arne, Tristan Perez, and Andrea Cristofaro. "Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment." *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 17.12 (2016): 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
16. Zhuang, Jiayuan, Jing Luo, Yuanchang Liu, Richard Bucknall, Hanbing Sun, and Cheng Huang. "Collision avoidance for unmanned surface vehicles based on COLREGS." *2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2019. 1418–1425. DOI: 10.1109/ICTIS.2019.8883829.
17. Guan, Wei, and Kuo Wang. "Autonomous collision avoidance of unmanned surface vehicles based on improved A-star and dynamic window approach algorithms." *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 15.3 (2023): 36–50. DOI: 10.1109/MITS.2022.3229109.
18. Wang, Peiqi, Xiaolan Yao, Qing Fei, and Jiekun Meng. "Research on Local Path Planning for Autonomous Collision Avoidance of USV." *2022 China Automation Congress (CAC)*. IEEE, 2022. 5368–5373. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10055154.
19. Chao, Wu, Ma Feng, Wu Qing, and Wang Shuwu. "A situation awareness approach for usv based on artificial potential fields." *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2017. 232–235. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047770.
20. Chen, Qing-Da, Sheng-Wei Huang, Ming-Hsin Ho, Feng-Yeang Chung, Chun-Han Chu, Chi-Min Liao, and Jenhwa Guo. "Vector Field-Based Guidance Method for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles." *2023 IEEE Underwater Technology (UT)*. IEEE, 2023. DOI: 10.1109/UT49729.2023.10103386.
21. Naeem, Wasif, Sable Campbell, and Mamun Abu-Tair. "Collision avoidance of maritime vessels." *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles*. 2019. 61–84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.
22. Lazarowska, Agnieszka. "Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation." *The Journal of Navigation* 68.2 (2015): 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
23. Yuan-hui, Wang, and Chi Cen. "Research on optimal planning method of USV for complex obstacles." *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2016. 2507–2511. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558960.
24. Gamayanti, Nurlita, Rusdhianto Effendi Abdul Kadir, and Abdullah Alkaff. "Global Path Planning for USV Waypoint Guidance System Using Dynamic Programming." *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. IEEE, 2020. 248–253. DOI: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163712.
25. Ding, Fuguang, Zhaoqing Zhang, Mingyu Fu, Yuanhui Wang, and Chenglong Wang. "Energy-efficient path planning and control approach of USV based on particle swarm optimization." *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604920.
26. Kazakova, E.M. "Application of particle swarm method in the optimization problems." *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS* 5(109) (2022): 48–57. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-48-57.
27. Wang, Chengbo, Xinyu Zhang, Longze Cong, Junjie Li, and Jiawei Zhang. "Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments." *Evolving Systems* 10.4 (2019): 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
28. Akmaykin, D.A., S. F. Klyueva, and P. A. Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
29. Son, Nam-Sun, and Sun-Young Kim. "On the sea trial test for the validation of an autonomous collision avoidance system of unmanned surface vehicle, ARAGON." *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604803.
30. Son, N.S. "On an Autonomous Navigation System for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicle." *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*. 2013. 470–476.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чабак Артём Андреевич — аспирант

Научный руководитель:

Дерябин Виктор Владимирович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: beshan74@gmail.com, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chabak, Artem A. — Postgraduate

Supervisor:

Deryabin, Viktor V. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: beshan74@gmail.com, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 марта 2024 г.

Received: March 11, 2024.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-271-281

FORECASTING THE VOLUME OF DEFECT DETECTION WORKS ON A RIVER FLEET VESSEL HULL

A. B. Krasiuk

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

The issue of using the new Instruction for defect detection of hulls of vessels for river and mixed (river-sea) navigation to predict the number of measurements of hull structures during the subsequent regular survey is discussed in the paper. The electronic version of the defect detection report tables provided for in the Instruction allowing the necessary calculations to be performed is taken into account. At the moment, defect detection of a ship hull is the examination, measurement and assessment of defects in each element of the ship's hull in order to establish method and volumes of repairs that ensure its reliable operation until the next regular survey under specified operating conditions. However, the application of the new Instruction will not allow us to measure every element of the ship's hull, but only those elements whose measurement is necessary. An algorithm for filling out the defect detection report tables in their electronic version is provided in the paper, and the need for a preliminary (calculation) stage of defect detection, which is essentially an analogue of the concept of the zero stage in ship repair, is substantiated. The preliminary stage of defect detection is based on a probabilistic approach to predicting the residual thicknesses of individual ship's hull elements using known wear rates and data from ship's hull defects detection performed previously. The results of calculations of a test example for a representative vessel, for which detailed information both on the hull constructions and on the results of measurements during the previous survey and repair is available, are presented. Using the test example, it is proven that introduction of the preliminary stage of defect detection process will reduce number of measurements of hull structures by 78 % compared to the traditional approach to performing the detection work. The necessity of development at the preliminary stage not only electronic table, but illustrating maps of measurements of the main hull structures, examples of which are given, is substantiated.

Keywords: Ship hull defect detection, ship hull element, defect, wear rate, remaining thickness, forecasting in ship repair, technical condition of the ship's hull.

For citation:

Krasiuk, Alla B. "Forecasting the volume of defect detection works on a river fleet vessel hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 271–281. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-271-281.

УДК: 620.165.29:629.5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ДЕФЕКТАЦИОННЫХ РАБОТ КОРПУСА РЕЧНОГО СУДНА

А. Б. Красюк

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

В статье рассмотрен вопрос применения нового документа: «Инструкции по дефектации корпусов речных судов и смешанного река – море плавания, поднадзорных РКО» для прогнозирования числа замеров корпусных конструкций при последующем очередном освидетельствовании. Принимается во внимание

электронный вариант таблиц акта дефектации, предусмотренный новым документом, позволяющих выполнять необходимые расчеты. На текущий момент под дефектацией корпуса судна понимается обследование, измерение и оценка дефектов каждого элемента корпуса судна с целью установления способов и объемов ремонта, обеспечивающих надежную эксплуатацию его до следующего очередного освидетельствования в заданных условиях эксплуатации. Применение новой инструкции позволит выполнять измерение не всех элементов корпуса судна, а только тех, измерение которых является целесообразным. Приводится алгоритм заполнения таблиц акта дефектации в электронном виде, обоснована необходимость проведения предварительного (расчетного) этапа дефектации, являющегося, по сути, аналогом понятия «нулевой этап в судоремонте». Отмечается, что выполнение предварительного этапа дефектации основано на вероятностном подходе к прогнозированию остаточных толщин отдельных элементов корпуса с использованием известных скоростей изнашивания и данных дефектаций корпуса, выполненных в процессе проведенных ранее исследований. Приведены результаты расчетов контрольного примера по судну-представителю, для которого имеются подробные сведения как о конструкции корпуса, так и о результатах измерений при предыдущем освидетельствовании и ремонте. На контрольном примере доказано, что внедрение предварительного этапа дефектации позволит сократить необходимое число измерений корпусных конструкций на 78 % по сравнению с традиционным подходом к выполнению дефектационных работ. Обоснована необходимость разработки на предварительном этапе не только электронных таблиц, но и соответствующих карт замеров основных корпусных конструкций.

Ключевые слова: дефектация корпуса, элемент корпуса судна, дефект, скорость изнашивания, остаточная толщина, прогнозирование в судоремонте, техническое состояние, корпус судна.

Для цитирования:

Красюк А. Б. Прогнозирование объема дефектационных работ корпуса речного судна / А. Б. Красюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 271–281. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-271-281.

Введение (Introduction)

Надежная эксплуатация корпуса судна подразумевает его способность выполнять требуемые функции в заданных условиях при соблюдении периодичности освидетельствований и ремонтов. Понятие *надежная эксплуатация корпуса судна* связано с понятиями: *дефект* и *отказ*. Более 90 % дефектов в течение всего срока эксплуатации судна составляет износ корпусных конструкций, т. е. дефект, являющийся наиболее прогнозируемым из всех существующих видов дефектов корпуса судна.

В ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова разработана новая «Инструкция по дефектации корпусов судов внутреннего и смешанного *река – море* плавания, поднадзорных РКО»¹ (далее — Инструкция) [1], основанная на вероятностном подходе, которая позволяет существенно сократить число замеров корпусных конструкций (при гарантированном обеспечении надежности эксплуатации), что может быть выгодно для судовладельца, но неэффективно для судоремонтного завода и исполнителя дефектации. Разработанная Инструкция предполагает проведение так называемого *предварительного этапа дефектации*, позволяющего заблаговременно, до осуществления процедуры измерения корпусных конструкций, рассчитать прогнозные остаточные толщины и разработать оптимальную схему замеров корпусных конструкций. В случае выполнения замеров сотрудниками завода-исполнителя ремонта данный предварительный этап можно рассматривать как аналог понятия *нулевой этап в судоремонте*, позволяющий выровнять загрузку судоремонтного предприятия по периодам года.

При использовании новой Инструкции и внедрении предварительного этапа дефектации сотрудники отдела дефектации будут загружены работами, связанными с подготовительными или промежуточными расчетами с обоснованием количества измеряемых элементов с учетом их расположения на корпусе судна и формированием оптимальной карты замеров корпусных конструкций. К работам по формированию оптимальной карты замеров корпусных конструкций могут быть подключены также сотрудники иных компетентных организаций. В любом случае предварительный (расчетный) этап может повысить достоверность данных, представленных в таблицах акта дефектации, позволяя выполнять измерения только тех элементов конструкций корпуса, которые действительно нуждаются в обследовании.

¹ РКО — Российское классификационное общество

Методы и материалы (Methods and Materials)

Контрольный пример расчета, выполненного по электронным таблицам. В статье [2] доказано, что использование статистических данных о скоростях изнашивания позволяет прогнозировать уровень общей и местной прочности с достаточной достоверностью. По итогам результатов расчетов, полученных в разработанных электронных таблицах, можно сделать вывод о техническом состоянии отдельных элементов корпуса и групп связей. Выполненные ранее расчеты и исследования доказали достоверность использования вероятностного подхода к определению прогнозируемых остаточных толщин [3]–[5]. Так, в контрольном примере, приведенном в [2], выполнен расчет характеристик $\Delta F_{\text{ост}i}$ и $\Delta F_{\text{ост.прог}i}$:

$$\Delta F_{\text{ост}i} = b_i (t_{\text{ост}i} - [t_{\text{ост}}]), \quad (1)$$

где $\Delta F_{\text{ост}i}$ — характеристика, рассчитанная исходя из результатов измерения остаточных толщин;
 $t_{\text{ост}i}$ — остаточная толщина элемента, определенная по результатам измерений;
 b_i — размер элемента в плане корпуса судна (ширина пояса обшивки или настила, высота стенки балки набора, ширина стенки балки набора);
 $[t_{\text{ост}}]$ — допускаемая остаточная толщина группы связей;

$$\Delta F_{\text{ост.прог}i} = b_i (t_{\text{ост.прог}i} - [t_{\text{ост}}]), \quad (2)$$

где $\Delta F_{\text{ост.прог}i}$ — характеристика, рассчитанная по прогнозируемой остаточной толщине;
 $t_{\text{ост.прог}i}$ — прогнозируемая остаточная толщина элемента, рассчитанная по формуле (3).

При известном количестве лет службы элемента в группе связей прогнозируемая остаточная толщина рассчитывается следующим образом:

$$t_{\text{ост.прог}i} = t_{\text{при}} - \bar{C}(1 + m'\sigma_c)\tau_i, \quad (3)$$

где τ_i — количество лет службы элемента в составе группы связей;

$\bar{C}$ — скорость изнашивания элемента корпуса, определяемая согласно Правилам классификации и постройки судов¹ (далее — ПКПС);

$\sigma_c = C(0,51 - 1,06C)$ — стандарт скорости изнашивания;

m' — коэффициент, определяемый в зависимости от числа элементов в составе группы связей n' с одинаковым значением допускаемого износа $[\Delta t]$.

Значения коэффициента m' в зависимости от числа элементов в составе группы связей n' следующие:

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

Расчет контрольного примера показал, что для всех групп связей характеристика $\Delta F_{\text{ост.прог}i}$, определенная по прогнозной остаточной толщине, оказалась меньше аналогичной характеристики, рассчитанной по результатам измерения остаточных толщин $\Delta F_{\text{ост}i}$, т. е. $\Delta F_{\text{ост.прог}i} < \Delta F_{\text{ост}i}$. Выполненный расчет доказал, что использование вероятностного подхода к определению остаточных толщин не приведет к снижению надежности оценки технического состояния корпусных конструкций.

Содержание предварительного этапа дефектации. Имеющиеся в новой Инструкции таблицы оформления результатов дефектации позволяют использовать их для выявления именно тех элементов корпуса, которые при очередном плановом освидетельствовании необходимо измерить. Пример общей формы заполнения таблицы прогнозирования замеров корпусных конструкций на предварительном этапе приведен в табл. 1. Данный подход можно применить в том случае, если у судовладельца (либо на предприятии — исполнителе ремонта и дефектации) имеются данные предыдущего освидетельствования корпуса судна. В этом случае используется электронный вариант таблиц, позволяющий выполнять необходимые расчеты.

¹ Правила классификации и постройки судов: в 2 ч. Ч. I : Корпус и его оборудование. М., 2019.

Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа

Район	Район № III	Средняя часть							Участок № III-2				Нач. шп. 70			Кон. шп. 79	Примечание								
		Проектная толщина (фактическая толщина по результатам предыдущей дефектации)	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	Прогнозируемая остаточная толщина	Допускаемая остаточная толщина отдельного элемента по табл. 3.6.5 ПОСЭ	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	Техническое состояние											
(пояс/номер)	$t_{пр}^*$, мм														b_l , м	τ_l , лет	Δt , мм	n'	$t_{ост1}$	$t_{ост2}$	$t_{ост3}$	$t_{ост i}$	$t_{ост. прог i}$, мм	$t_{ост min}$, мм	$t_{ост}$, мм
1. Обшивка днища	А	VI скуловой	В	7,9	1,55	5	0,8	10				7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
				ЛБ	7,9	1,58	5	0,8	10																
					7,8	1,47	5	0,8	10																
					7,8	1,55	5	0,8	10																
					7,8	1,16	5	0,8	10																
					7,8	1,58	5	0,8	10																
			ПБ	7,8	1,58	5	0,8	10																	
				7,9	1,58	5	0,8	10																	
				7,8	1,55	5	0,8	10																	
				7,8	1,47	5	0,8	10																	
				7,9	1,58	5	0,8	10																	
				7,8	1,55	5	0,8	10																	
			Σ																					0,00063	

Алгоритм заполнения табл. 1 следующий:

1. Создается копия электронного варианта таблиц по итогам предыдущей дефектации.
2. Устанавливается число лет эксплуатации судна с момента предыдущей дефектации до следующего очередного освидетельствования с округлением в большую сторону до следующего целого числа лет. Полученные данные вносятся в столбец 4 таблицы.
3. Из таблиц предыдущей дефектации в столбец 5 таблицы вносятся данные о допускаемом износе, рассчитываемом как разница между проектной толщиной $t_{\text{пр}i}$ и допускаемой остаточной для группы связей $[t_{\text{ост}}]$:

$$[\Delta t] = t_{\text{пр}i} - [t_{\text{ост}}]. \quad (4)$$

4. В столбце 2 вместо проектной толщины элемента группы связей $t_{\text{пр}i}$ указывается фактическая остаточная толщина данных элементов $t_{\text{пр}i}^*$, определенная по итогам предыдущей дефектации в столбце 10 аналогичной таблицы.

5. После заполнения столбца 2 таблица в автоматическом режиме рассчитывает прогнозируемую остаточную толщину на момент выполнения очередного освидетельствования (заполнение столбца 11 по формуле (3)) и соответствующую характеристику (заполнение столбца 15 по формуле (2)).

6. В случае, если итоговая сумма характеристик $\sum \Delta F_{\text{ост.прог}i}$ отрицательна, то при очередном освидетельствовании следует в первую очередь выполнить измерения тех элементов группы связей, у которых частная характеристика $\Delta F_{\text{ост.прог}i}$ имеет отрицательное значение, и при необходимости выполнить измерения остальных элементов группы связей или дополнительные измерения в соответствии с требованиями Инструкции.

7. В случае, если итоговая сумма характеристик $\sum \Delta F_{\text{ост.прог}i}$ имеет положительное значение и прогнозные значения остаточных толщин всех элементов группы связей $t_{\text{ост.прог}i}$ не менее допускаемой минимальной остаточной толщины $[t_{\text{ост}min}]$, указанной в столбце 12, измерения можно не выполнять.

8. При положительной итоговой сумме характеристик группы связей $\sum \Delta F_{\text{ост.прог}i}$ и в случае если для отдельных элементов группы связей прогнозные значения остаточных толщин $t_{\text{ост.прог}i}$ менее допускаемой минимальной остаточной толщины $[t_{\text{ост}min}]$, можно сделать вывод об обеспеченности общей прочности, но при этом следует выполнить замеры отдельных элементов, не удовлетворяющих критерию местной прочности ($t_{\text{ост.прог}i} < [t_{\text{ост}min}]$).

9. Для остальных элементов корпуса и групп связей, удовлетворяющих критериям прочности по результатам расчетов, выводы о необходимости выполнения измерений делают на основе итогов визуального осмотра (наличие язвенного износа и прочих дефектов).

10. На предварительном этапе столбцы 7–10 и 14 таблицы остаются без заполнения.

Примечание. В табл. 2 приведен пример выполнения расчетов предварительного этапа дефектации в случае, когда общая прочность группы связей и местная прочность отдельных элементов обеспечены.

Прогнозирование объема дефектационных работ. Примером реализации использования электронных таблиц новой Инструкции для прогнозирования объема дефектационных работ является расчет, выполненный по судну-представителю — танкеру «Волгонефть-266» класса РКО «М–СП 3,5» проекта № 1577/5886. Корпус данного судна был обновлен в 2012 г. по проекту 1577/550А-ЛМПП, в 2019 г. была выполнена подробная (поэлементная дефектация) корпуса данного теплохода. Поскольку следующее очередное освидетельствование корпуса т/х «Волгонефть-266» должно производиться в межнавигационный период, можно точно определить срок службы элементов корпуса, приняв его $\tau_i = 5$ лет.

Расчет прогнозируемых остаточных толщин $t_{\text{ост.прог}i}$ и соответствующих им характеристик выполнен для следующих связей корпуса судна:

- листовых элементов и набора продольного направления;
- поперечных переборок и полупереборок;
- набора поперечного направления.

По результатам предыдущей дефектации т/х «Волгонефть-266» в 2019 г. известно фактическое число замеров ранее указанных элементов корпуса. Так, общее количество измерений составило 13926 точек (в том числе по листовым элементам и набору продольного направления — 9239 точек; по поперечным переборкам и полупереборкам — 438 точек; по набору поперечного направления — 4426 точек). Ожидается, что такое же количество измерений должно быть и при очередном освидетельствовании корпуса в следующий межнавигационный период.

Выполненные расчеты с использованием электронных таблиц показали, что необходимое число измерений можно существенно уменьшить. Так, в соответствии с подходом, предусмотренным в новой Инструкции, необходимо выполнить измерения в 2991 точке листовых элементов и набора продольного направления (сокращение количества измерений на 67,6 %), а также в шестидесяти точках набора поперечного направления (сокращение количества измерений 98,6 %). Конструкции поперечных переборок и полупереборок можно не измерять ввиду 100 %-го сокращения числа точек замеров. В целом по корпусу судна сокращение точек замеров составит 78,4 %.

Таблица 2

Сопоставление требуемого количества измерений отдельных связей корпуса при поэлементной дефектации т/х «Волгонефть» и с применением новой Инструкции

Наименование связи	Количество точек измерения		Сокращение числа точек измерения, %
	Поэлементная дефектация	Новая Инструкция	
Обшивка днища	835	189	77,4
Обшивка борта (ниже ватерлинии)	292	21	92,8
Обшивка борта (выше ватерлинии)	288	6	97,9
Настил палубы	807	414	48,7
Настил второго дна	450	0	100
Обшивка внутренних бортов	360	0	100
Обшивка диаметральной переборки	252	0	100
Карлингсы	509	180	64,6
Продольные ребра жесткости палубы в балластных отсеках	902	357	60,4
Продольные ребра жесткости палубы в грузовых танках	885	819	7,5
Днищевые стрингеры	609	198	67,5
Продольные ребра жесткости днища	1032	807	21,8
Продольные ребра жесткости настила второго дна	888	0	100
Бортовые стрингеры	494	0	100
Продольные ребра жесткости внутренних бортов	630	0	100
Всего по листовым элементам и набору продольного направления	9239	2991	67,6
Поперечные переборки и полупереборки	438	0	100
Поперечные ребра жесткости палубы	42	0	100
Бимсы холостые	186	0	100
Бимсы рамные	1104	0	100
Рамные шпангоуты	868	0	100
Холостые шпангоуты	540	0	100
Рамные шпангоуты второго борта	372	0	100
Стойки диаметральной переборки	246	0	100
Флоры	1068	60	94,3
Всего по набору поперечного направления	4426	60	98,6

В табл. 2 приведены результаты более подробного анализа по отдельным корпусным конструкциям (связям) т/х «Волгонефть-266», откуда видно, что наибольшее сокращение числа необхо-

димых измерений при использовании новой Инструкции у поперечных переборок, полупереборок и набора поперечного направления. Это обусловлено тем, что Правилами освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ) для данных элементов корпуса установлены менее жесткие требования к остаточным толщинам по сравнению с аналогичными величинами, установленными для связей продольного направления (как листовых, так и набора). Стопроцентное сокращение числа замеров таких продольных связей как настил второго дна, обшивка внутренних бортов, диаметральной переборки и подкрепляющего данные связи набора, объясняются тем, что данные элементы корпуса были заменены на новые в 2012 г. и требования ПОСЭ к ним менее жесткие, чем к крайним связям корпуса (настилу палубы и обшивке днища). Для тех связей, измерение которых необходимо осуществить в соответствии с требованиями данной Инструкции, был выполнен анализ их расположения по районам корпуса, результаты которого приведены на рис. 1.



Рис. 1. Распределение общего количества измерений элементов по районам корпуса судна
Fig. 1. Distribution of the total number of elements measurements by regions of the ship's hull

Как видно из диаграммы на рис. 1, элементы связей в районе носовой оконечности можно практически не измерять, за исключением одного листа наружной обшивки днища. Наибольшее число конструкций, требующих дополнительных измерений, находится в средней части корпуса судна, что объясняется более строгими требованиями ПОСЭ к прочности конструкций, расположенных в грузовой зоне.

Значительное число измерений следует осуществить в таких зонах корпуса, как «переходный район от средней части к кормовой оконечности» и «кормовая оконечность». Несмотря на то, что Правилами освидетельствования судов в процессе их эксплуатации к связям корпуса данных районов предъявляются менее жесткие требования по сравнению со средней частью корпуса, прогнозные толщины многих элементов здесь менее допускаемых значений. Это объясняется тем, что при обновлении корпуса т/х «Волгонефть-266» в 2012 г. была выполнена замена на новые конструкции, расположенные главным образом в грузовой зоне. Конструкции, расположенные от средней части судна к корме, были заменены лишь отдельными участками.

Разработка карт замеров корпусных конструкций. При выполнении предварительного этапа дефектации целесообразно по результатам расчетов в таблицах подготовить карты замеров корпусных конструкций, наличие которых повысит наглядность результатов расчетов и ускорит выполнение основного этапа дефектации. За основу для подготовки таких карт следует взять растяжки обшивок и настилов из предыдущей дефектации. После небольшой обработки в простейшем графическом редакторе на картах замеров следует отразить фоном или штриховкой расположение мест измерений с точным указанием номеров шпангоутов и поясов по результатам расчетов, выполненных в таблицах предварительного этапа. На рис. 2–4 приведены примеры оформления подобных карт замеров с использованием следующих условных обозначений: ЛБ — левый борт; ПБ — правый борт; ДП — диаметральной плоскости; t8 — пример обозначения проектной (исходной) толщины элемента (8 мм); VI пояс — пример обозначения номера пояса обшивки или настила. По оси ДП указаны номера практических шпангоутов.



Рис. 2. Пример оформления карты замеров остаточных толщин настила главной палубы
Fig. 2. An example of drawing up a map of measurements of the residual thicknesses of the main deck plate

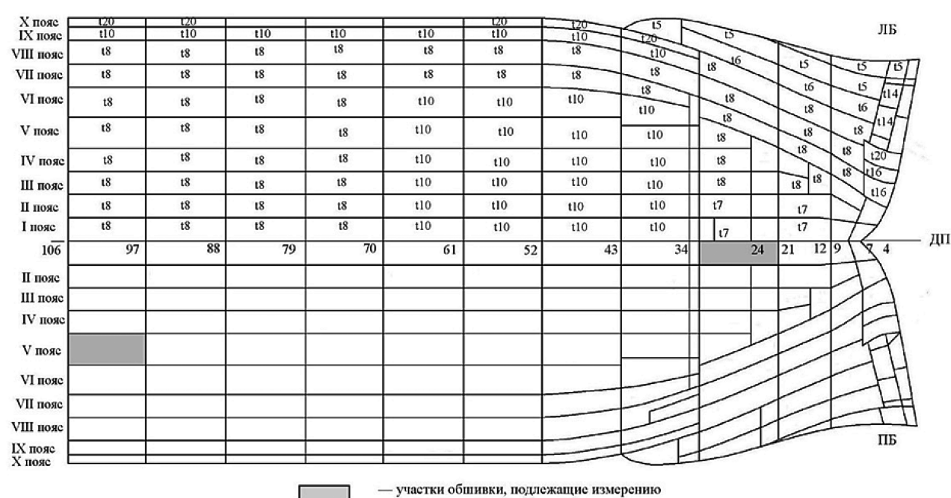


Рис. 3. Пример оформления карты замеров остаточных толщин обшивки днища и наружных бортов
(от четвертого носового шпангоута до шп. 106 средней части)
Fig. 3. An example of drawing up a map of measurements of the residual thicknesses of the bottom and sides shell
(from the fourth bow frame to the frame 106 of the middle part)

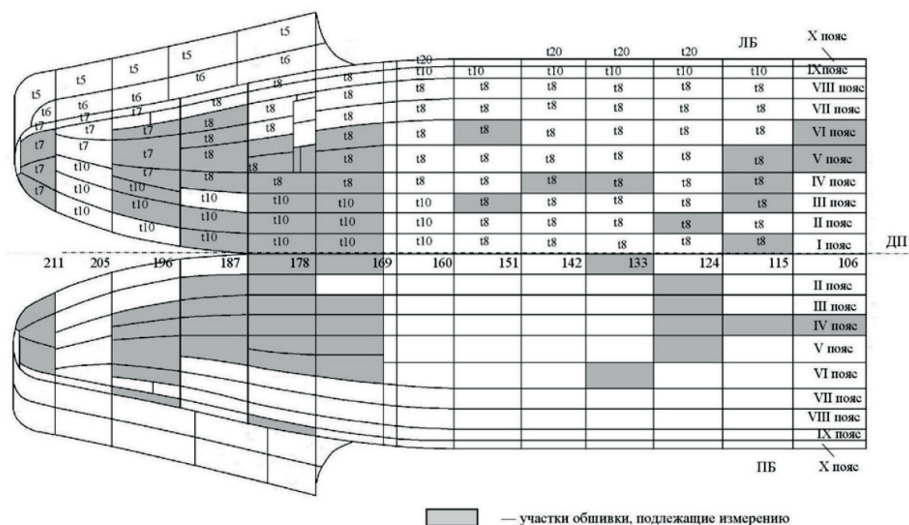


Рис. 4. Пример оформления карты замеров остаточных толщин обшивки днища и наружных бортов
(от шп. 106 средней части до 211 шп. кормовой оконечности)
Fig. 4. An example of drawing up a map of measurements of the residual thicknesses of the bottom and sides shell
(from the frame 106 of the middle part to the frame 211 of the stern part)

Из рис. 2 видно, что настил палубы в грузовой зоне следует измерить практически полностью за исключением пояса палубного стрингера. Измерение наружной обшивки в районах от носовой оконечности до шп.106 ограничивается дефекацией только двух листов (см. рис. 3). Остальная часть наружной обшивки (см. рис. 4) требует более подробных измерений и обследований. Подобные карты замеров можно составить и для иных листовых элементов корпуса, а также для балок набора, подкрепляющих те или иные обшивки и настилы. Причем расположение измеряемых балок набора можно указать на растяжке соответствующей подкрепляемой конструкции.

Обсуждение результатов (Results and Discussions)

В результате выполненных расчетов с применением новой Инструкции доказано, что число измерений остаточных толщин элементов путем проведения предварительного этапа дефектации корпуса можно существенно сократить. В работах [1]–[3] доказано, что использование вероятностного подхода, предусмотренного новой Инструкцией, гарантирует 95 %-ю достоверность прогнозирования уровня общей и местной прочности.

Вопросами снижения трудоемкости дефектационных работ занимались такие ученые как Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева, О. К. Зяблов [6], [7]. Так, в работе [6] был разработан алгоритм процесса выполнения измерений дефектов корпуса, направленный на снижение трудоемкости процесса дефектации. В работах этих авторов обоснована также необходимость использования в практике дефектации электронных вариантов таблиц [7], [8]. Прогнозированию общей и местной прочности корпусов судов в эксплуатации посвящены работы ученых: П. А. Бимберекова [9], Е. Г. Бурмистрова и Д. А. Кромов [10], Е. П. Бураковского и П. Е. Бураковского [11], Т. О. Огневого [12]. Вопросы определения технического состояния корпусов судов в эксплуатации с учетом требований классификационных обществ рассмотрены в статьях П. А. Бимберекова [13], П. В. Зановьева, В. А. Компанца и О. Э. Сухова [14], а также С. Н. Гирина, И. А. Гуляева и Ю. И. Ефименкова [15].

В данной статье исследованы расширенные возможности использования электронных таблиц акта дефектации, а именно прогнозирование уровней общего и местного износа элементов корпуса в перспективе, а также доказана целесообразность проведения предварительного (расчетного) этапа дефектации, позволяющего снизить трудоемкость и стоимость дефектационных работ.

Отличие настоящего исследования от выполненных ранее состоит в создании алгоритма заполнения электронных таблиц акта дефектации при их использовании в целях прогнозирования. В частности, обоснована необходимость разработки на предварительном этапе карт замеров корпусных конструкций в целях упрощения работы специалистов по дефектации. Несмотря на разные подходы к снижению трудоемкости дефектационных работ, представленные в настоящей статье и в публикации [6], противоречий в решении данного вопроса не существует, поэтому возможно также совместное использование двух подходов к дефектации, которое приведет как к повышению качества освидетельствования судов, так и к значительному экономическому эффекту за счет снижения трудоемкости.

Заключение (Conclusion)

Подход к дефектации, предусмотренный новой Инструкцией, обеспечивая надежность полученных результатов, позволит существенно снизить затраты как непосредственно на дефектацию, так и на ремонт судна путем сокращения времени нахождения судна в ремонте.

В результате выполненного исследования получены следующие результаты:

- обоснована необходимость проведения предварительного (расчетного) этапа дефектации;
- разработан алгоритм заполнения электронных таблиц акта дефектации на предварительном этапе;
- обоснована целесообразность формирования на предварительном этапе карт замеров корпусных конструкций и приведены примеры;

– предусмотрены два варианта выполнения работ предварительного этапа:

1-й вариант — сотрудниками организации — исполнителя дефектационных работ по приведенному алгоритму (это позволит уменьшить время выполнения измерений при тяжелых условиях труда на открытом воздухе, но загрузит персонал интеллектуальным трудом);

2-й вариант — с привлечением персонала сторонних компетентных организаций.

Использование любого варианта проведения предварительного этапа, предшествующего факту очередного освидетельствования судна, будет выгодно судовладельцу как за счет сокращения стоимости ремонтных работ, так и за счет сокращения цикла ремонта. При этом также возможно косвенное влияние на деятельность судоремонтных предприятий, а именно высвобождение производственной мощности (пропускной способности) слипов и доков при сокращении цикла ремонта судов.

При наличии интереса у судовладельцев в вопросе оптимизации дефектационных работ сотрудники ГУМРФ имени адм. С. О. Макарова могут разработать электронные таблицы акта дефектации по конкретному проекту судна и выполнить необходимые расчеты.

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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Кочнев Ю. А. Разработка математической модели и алгоритма определения последовательности дефектации корпуса судна / Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева, О. К. Зяблов // Научные проблемы водного транспорта. — 2024. — № 78. — С. 66–75. DOI: 10.37890/jwt.vi78.455.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Бураковский Е. П. Нормирование параметров прогрессирующих дефектов корпусов судов / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский // Инновации в науке и образовании – 2011. Труды IX Международной науч. конф.: в 2 ч. — Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2011. — Т. 1, ч. 1. — С. 345–347.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Kochnev, Yuri A., Irina B. Kochneva, and Oleg K. Zyblov. "Development of a mathematical model and algorithm for the sequence of fault detection of the ship's hull." *Russian Journal of Water Transport* 78 (2024): 66–75. DOI: 10.37890/jwt.vi78.455.
7. Zyblov, Oleg K., Yuri 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.
8. Zyblov, 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Ogneva, V. V., and E. G. Burmistrov. "Features of forecasting regarding ship hull wear when estimating shiprepair scope." *Sudostroenie* 5(816) (2014): 46–49.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Красюк Алла Борисовна —
кандидат технических наук, доцент
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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Krasiuk, Alla B. —
PhD, associate 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

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2024 г.

Received: April 1, 2024.

INFLUENCE OF THE BRONZE POWDER FILLER ON THE ADHESION OF EPOXY COMPOUND TO ALUMINUM BRONZE

Y. N. Tsvetkov¹, N. M. Vihrov², Y. O. Fiaktistov¹

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

² — JSC “KSZ”, St. Petersburg, Russian Federation

The tests to determine the adhesion of epoxy compound K-153, containing different amount of bronze powder, to aluminum bronze are carried out. As the bronze powder the filings, which are obtained by filing the rolled rod of bronze BrAZhNMts9–4–4–1, are used. The conventional size of the bronze particles amounts to 18 μm . The epoxy compositions are applied over the plates made out of BrAZhNMts9–4–4–1. The mentioned bronze is chosen as close analogue by composition to bronze BrA9Zh4N4L, used to cast ship propellers. The plates thickness is 4...5 mm, and the plates dimensions in plan are equal to approximately 50 by 100 mm. Before being coated the plates are ground with abrasive paper of different grain to obtain the arithmetical mean deviation of the surface profile equal to 0,5...0,900 μm . Coating the plates and aging the coatings are produced at temperature of $19\pm 1^\circ\text{C}$ and ambient air relative humidity of $50\pm 5\%$. The average thickness of the coating amounts to 2,1 mm. The experiments are conducted after keeping the epoxy coating during 7 days. The tests are carried out according to the scheme, regulated by the GOST 32299–2013 “Paint materials. Pull-off test for adhesion”. According to the scheme, metallic cylinders of the 19 mm diameter are stuck to the coating; preliminarily the spots of sticking are processed with abrasive cloth and solvent. Then the circular cuts are made in the coating around each cylinder and the cylinders are pulled off under the force directed perpendicularly to the coating, and the peel strength is recorded. The addition of bronze powder into the epoxy compound does not affect the peel strength that is the precipitation of the bronze particles in the epoxy compound during its hardening does not result in the decrease in the contact area of the epoxy resin with the bronze surface. This conclusion is confirmed by the calculation estimation: the calculated thickness of the resin layer in between a bronze particle and the plate surface after the completion of resin hardening is three orders of magnitude greater than the diene resin molecule size. It means that epoxy resin viscosity is too high, and the size and the mass of the particles are too small in order for the squeezing the resin, even partial, from under the particles takes place during the slow precipitation of the particles.

Keywords: epoxy resin, hardener, filler, aluminum bronze, bronze powder, bronze particle size, adhesion, bronze plates, epoxy coating, peel strength.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., Nikolay M. Vihrov, and Yaroslav O. Fiaktistov. “Influence of the bronze powder filler on the adhesion of epoxy compound to aluminum bronze.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289.

УДК 669.35 + 620.179

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ БРОНЗОВОГО ПОРОШКА НА АДГЕЗИЮ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА К АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЕ

Ю. Н. Цветков¹, Н. М. Вихров², Я. О. Фиактистов¹

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

² — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены испытания на адгезию эпоксидного компаунда K-153, содержащего разное количество бронзового порошкового наполнителя. В качестве бронзового порошка были использованы бронзовые опилки, полученные опиливанием катаного прутка из алюминиевой бронзы BrAЖНМц9–4–4–1. Условный размер частиц бронзы оценивали по значению средней длины хорды сечения частиц, составляющему 18 мкм. Эпоксидные составы наносили на пластины из бронзы BrAЖНМц9–4–4–1. Указанная бронза выбрана

как очень близкая по составу к бронзе БрА9Ж4Н4Л, применяемой для литья гребных винтов. Толщина пластин 4–5 мм, размеры пластин в плане составляли примерно 50 × 100 мм. Пластины перед заливкой компаундом шлифовали на шкурках разной зернистости, среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности пластин находилось в диапазоне 0,500 ... 0,900 мкм. Заливка и выдержка пластин производились при температуре $19 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$. Средняя толщина эпоксидного покрытия на пластинах составила 2,1 мм. Эксперименты на адгезию проводили после выдержки эпоксидного покрытия в течение семи дней. Испытания проводили по схеме, регламентированной ГОСТом 32299–2013 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва с использованием механического адгезиметра». Согласно данной схеме к покрытию приклеивали металлические грибки диаметром 19,5 мм, предварительно обработав места приклеивания шкуркой и протерев их растворителем. После этого вокруг каждого грибка делали круговой вырез в покрытии, отрывали грибки под действием усилия, направленного перпендикулярно покрытию, и регистрировали прочность на отрыв. Было установлено, что добавка металлического порошка не оказывает влияния на значение прочности отрыва, т. е. осаждение частиц бронзы в эпоксидном компаунде при его отверждении не приводит к уменьшению площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью бронзы. Этот вывод подтверждается также расчетным способом: оценка толщины слоя эпоксидной смолы между частицей бронзы и поверхностью пластины показала, что к моменту полного отверждения эпоксидного компаунда толщина указанного слоя на три порядка превысит размер молекулы диановой смолы. Значит, вязкость эпоксидных смол слишком высока, а размеры и масса частиц используемых металлических порошковых наполнителей слишком малы, чтобы имело место хотя бы частичное выжимание смолы из-под частицы при ее медленном погружении.

Ключевые слова: эпоксидная смола, отвердитель, наполнитель, алюминиевая бронза, бронзовый порошок, размер частиц бронзы, адгезия, бронзовые пластины, эпоксидное покрытие, прочность на отрыв.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Влияние добавки бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе / Ю. Н. Цветков, Н. М. Вихров, Я. О. Фиакистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289.

Введение (Introduction)

Эпоксидные компаунды находят все более широкое применение в технике вследствие большого количества преимуществ [1], [2] по сравнению с другими полимерами. В судоремонте их используют при монтаже оборудования в корпусе судна и восстановлении изношенных поверхностей деталей судового оборудования [3], в частности при ремонте лопастей гребных винтов с очагами кавитационного износа на их поверхности [4]. Кавитационное изнашивание гребных винтов является распространенным явлением на водном транспорте [5], [6]. На гребном винте каждого четвертого морского транспортного судна возникают очаги кавитационного износа [6], при этом в отличие от быстроходных судов, на транспортных в основном очаги кавитационного износа возникают на концевых сечениях лопастей, что оказывает отрицательное влияние на КПД винта [7], [8]. Вместе с тем концевые сечения лопастей не испытывают таких нагрузок, как корневые сечения, поэтому вопросы прочности при устранении очагов кавитационного износа на их поверхности при ремонте отходят на второй план. На первое место выходит восстановление качества поверхности, поэтому направление ремонта, основанного на применении эпоксидных составов, может оказаться перспективным. Указанное направление будет активно развиваться в случае, если будет успешно решен вопрос повышения долговечности применяемых составов в условиях кавитационного воздействия.

Опыт эксплуатации гребных винтов с очагами кавитационного износа, заделанными эпоксидными ремонтными составами показывает, что долговечность таких покрытий зависит не только от их кавитационной износостойкости, но также в не меньшей мере от их адгезии к материалу лопасти. Эпоксидные материалы имеют значительно лучшую адгезию к металлам по сравнению с другими полимерами [1], [9]. Тем не менее и у эпоксидных смол уровень адгезии к металлам недостаточен и более чем на порядок ниже прочности самого эпоксидного материала. Поэтому граница между полимерным составом, ограничивающим район заделки очага износа на лопасти,

и материалом лопасти является слабым местом с точки зрения долговечности. Существуют разные теории адгезии [10]–[12]. Повышению адгезии эпоксидных составов уделяется серьезное внимание, однако многие вопросы недостаточно освещены в научных публикациях. Известно, что многие эпоксидные составы применяются с различными порошковыми наполнителями (например, используются порошки бронзы, титана и других металлов). При этом вопрос о влиянии этих наполнителей на адгезию эпоксидного компаунда с ремонтируемой поверхностью, в частности с поверхностью лопастей гребных винтов, остается открытым.

Целью работы является оценка влияния добавок бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе (как самому распространенному материалу гребных винтов).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для исследований выбрали следующий эпоксидный состав: модифицированная эпоксидная смола (компаунд) К-153 и отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА). Содержание отвердителя составило 10,7 % об. (100 частей смолы и 12 частей отвердителя). На основе указанного компаунда было подготовлено четыре состава, с разным содержанием бронзового порошка, а именно: 0, 5, 15 и 25 % по объему.

В качестве бронзового порошка использовали бронзовые опилки, которые получали опиливанием катаного прутка из алюминиевой бронзы БрАЖНМц9–4–4–1. Гистограмма распределения частиц бронзы по значению длины хорды их сечения представлена на рис. 1.

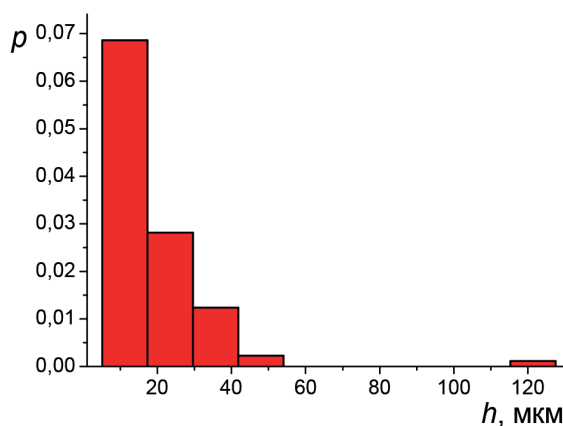


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц бронзы по размеру
Fig. 1. Histogram of bronze particles size distribution

Длину хорды частиц определяли на шлифе покрытия методом случайной секущей прямой [13], в качестве которой использовали линейку окуляр-микрометра металлографического микроскопа. Условный размер частиц бронзы оценивали по средневзвешенному значению длины h_{cp} хорды сечения частиц. Значение h_{cp} рассчитывали следующим образом:

$$h_{cp} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z h_i,$$

где h_i — длина хорды при пересечении секущей прямой с i -й частицей бронзы;
 z — общее число хорд, полученное на всех секущих линиях.

Размер частиц бронзы составил $h_{cp} = 18$ мкм.

Для оценки адгезии эпоксидные составы наносили также на пластины из бронзы БрАЖНМц9–4–4–1, очень близкой по составу к бронзе БрА9Ж4Н4Л, применяемой для литья гребных винтов. Толщина пластин составила 4–5 мм, размеры пластин в плане — примерно 50×100 мм. Пластины вырезали из катаного прутка, затем поверхность фрезеровали, шлифовали вручную абразивной шкуркой Mirca (P220). Параметр шероховатости Ra рабочей поверхности находился в диапазоне 0,500...0,900 мкм.

Перед нанесением эпоксидного состава по периметру каждой пластины сделали бортики из пластилина для предотвращения стекания эпоксидного компаунда в процессе заливки пластин и затвердевания. После этого поверхности пластин протирали вначале растворителем «Калоша», затем этиловым спиртом, потом высушивали и только после этого производили заливку пластин эпоксидным компаундом.

Испытания проводили по схеме (рис. 2), регламентированной ГОСТом 32299–2013, с использованием механического адгезиметра Novotest АМЦ-1. Согласно этой схеме к покрытию приклеивали металлические грибки диаметром $D = 19,5$ мм, предварительно обработав места приклеивания шкуркой и протерев растворителем. После этого вокруг каждого грибка делали круговой вырез в покрытии и грибки отрывали под действием усилия, направленного перпендикулярно покрытию, и регистрировали прочность на отрыв $p_{отр}$, МПа.

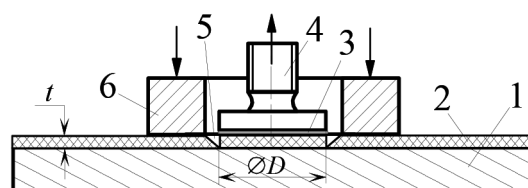


Рис. 2. Схема испытаний на адгезию:

1 — бронзовая пластина; 2 — эпоксидное покрытие; 3 — клей;
4 — грибок; 5 — круговой вырез в покрытии; 6 — упорное кольцо

Fig. 2. Adhesion test scheme:

1 — bronze plate; 2 — epoxy coating; 3 — glue;
4 — dowel; 5 — circular cut in the coating; 6 — thrust ring

Каждым составом заливали по две пластины (рис. 3). Заливку и выдержку пластин выполняли при температуре 19 ± 1 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 5 %. Средняя толщина t эпоксидного покрытия на пластинах (см. рис. 2) составила 2,1 мм. Эксперименты на адгезию проводили после выдержки эпоксидного покрытия в течение семи дней.

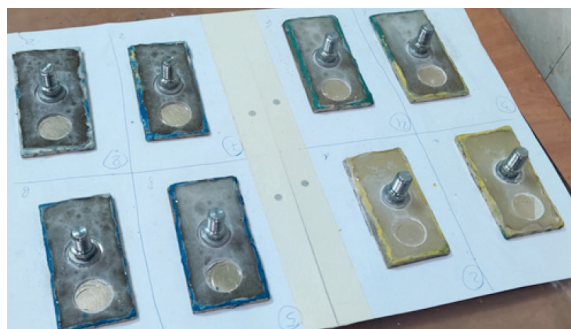


Рис. 3. Бронзовые пластины, залитые эпоксидным компаундом с разным содержанием порошка бронзы

Fig. 3. Bronze plates coated with epoxy compound with different contents of bronze powder

В процессе проведения испытаний на адгезию отрыв покрытия от пластин происходил по границе между покрытием и металлом (см. рис. 3). Для каждого состава произвели отрыв шести грибков, взяв за окончательный результат среднее арифметическое значение по шести измерениям.

Результаты (Results)

Результаты эксперимента представлены в виде графика $p_{отр}(V_{отн})$ на рис. 4, на основе анализа которого можно сделать следующие важные выводы:

1. Полученное значение прочности на отрыв компаунда без добавок бронзовых частиц $p_{отр} = 2,3 \pm 1,6$ МПа при 70 %-й доверительной вероятности. Если сравнить это значение со значением предела прочности эпоксидного компаунда ($\sigma_b = 63,3$ МПа), полученного ранее при испытании на одноосное растяжение¹, то можно сделать вывод о том, что адгезионная прочность примерно в 30 раз уступает когезионной прочности эпоксидного компаунда. Это является косвенным объяснением того, почему кавитационное разрушение начинается с границ между частицами наполнителя и эпоксидным связующим [14] и почему добавление частиц в эпоксидный компаунд не изменяет хрупкий характер его кавитационного разрушения.

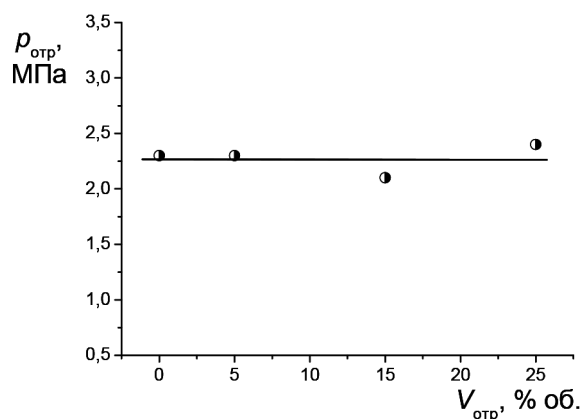


Рис. 4. Влияние содержания бронзовых частиц в эпоксидном компаунде К-153 на давление отрыва эпоксидного покрытия от поверхности пластин из бронзы БрАЖНМц9–4–4–1

Fig. 4. The influence of the bronze particles content in the epoxy compound K-153 on the peeling pressure of the epoxy coating from the surface of plates made of bronze BrAZHNMts9–4–4–1

2. Добавка металлического порошка не оказывает влияния на значение прочности отрыва. Это значит, что осаждение частиц бронзы в эпоксидном компаунде при его отверждении не приводит к уменьшению площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью бронзы.

Следует отметить, что в работе [15] выполнены исследования влияния добавок порошка цинка на адгезию эпоксидной смолы к пластинкам нержавеющей стали, оценка которой выполнялась, согласно китайскому стандарту GB/T 2791–1995, по усилию отрыва одной гибкой стальной пластинки от другой, склеенных эпоксидным составом. Частицы цинка имели размер около 37 мкм, опыты проводили с частицами цинка сферической и хлопьевидной формы. Перед добавкой в эпоксидную смолу порошок цинка проходил специальную обработку для повышения адгезии смолы к цинку.

Опыты показали, что с увеличением содержания цинкового порошка до 5 % по массе усилие отрыва сначала увеличивается примерно на 50 % при добавке хлопьевидных частиц и 10 % при добавке сферических частиц. При дальнейшем увеличении содержания цинка от 5 % до 30 % по массе усилие отрыва постепенно снижается, выходя на постоянный уровень. Однако в работе не уточняется характер отрыва (адгезионный, когезионный или смешанный) и толщина слоя эпоксидного компаунда между стальными пластинками. Если толщина слоя не превышала среднего размера частиц цинка, то частицы контактировали с пластинами, а значит, снижение усилия отрыва с увеличением концентрации порошка цинка объясняется уменьшением площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью стальных пластин. Что касается результатов, полученных в настоящем исследовании, то второй вывод относительно зависимости $p_{отр}(V_{отн})$ подтвержден в следующем разделе статьи расчетным способом.

¹ Опыты на одноосное растяжение проводили на образцах цилиндрического сечения, изготовленных по ГОСТу 11262–80 «Пластмассы. Метод испытаний на растяжение».

Анализ результатов (Analysis of the results)

Воспользуемся для оценки толщины слоя компаунда между частицами бронзового порошка и поверхностью бронзовой пластины уравнением Стефана – Рейнольдса, описывающего кинетику утончения слоя вязкой жидкости между двумя дисками [16]:

$$\tau = \frac{3\pi\eta r^4}{4F_N} \left(\frac{1}{\delta_{\text{ост}}^2} - \frac{1}{\delta_{\text{н}}^2} \right),$$

где τ — время изменения расстояния между дисками от начального значения $\delta_{\text{н}}$ до расстояния $\delta_{\text{ост}}$, равного остаточной толщине слоя жидкости;

η — динамическая вязкость выжимаемой жидкости;

r — радиус дисков;

F_N — сила, сжимающая диски.

Примем форму бронзовой частицы в виде диска диаметром и высотой, равными средней длине хорды $h_{\text{ср}}$ сечения частиц, т. е. 18 мкм. Тогда сила, сжимающая бронзовую частицу и пластину, зазор между которыми заполнен эпоксидной смолой, будет равна весу такой частицы, т. е.

$$F_N = \pi(0,5h_{\text{ср}})^2 h_{\text{ср}} \rho_{\text{бп}} g = 3,14 \cdot 9^2 \cdot 9 \cdot 7,65 \cdot 10^{-15} \cdot 9,8 = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

Согласно паспорту на эпоксидный компаунд К-153, его вязкость $\eta \approx 8$ Па·с при 25 °С. С учетом того, что время желатинизации смолы К-153 составляет 160 мин, примем $\tau = 160$ мин — время, в течение которого еще возможно какое-то движение бронзовой частицы к пластине при осаждении. В качестве начального расстояния $\delta_{\text{н}}$ между частицей и пластиной примем половину среднего значения толщины покрытия на пластинах, т. е. $\delta_{\text{н}} \approx 1$ мм. Тогда из формулы, приведенной на с. 284, определим

$$\delta_{\text{ост}} = \left(\frac{4F_N \tau}{3\pi\eta r^4} + \frac{1}{\delta_{\text{н}}^2} \right)^{-0,5} = \left(\frac{4 \cdot 1,7 \cdot 10^{-10} \cdot 9600}{3 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 9 \cdot 10^{-24}} + \frac{1}{0,001^2} \right)^{-0,5} = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,27 \text{ мкм.}$$

В работе [17] указывается, что объем молекулы эпоксидной смолы (до отверждения) составляет около $0,3 \text{ нм}^3$, а значит средний линейный размер молекулы равен примерно 0,7 нм. Как видно, полученное значение примерно на три порядка меньше рассчитанного значения $\delta_{\text{ост}}$, т. е. несмотря на то, что и происходит процесс осаждения микрочастиц бронзы в эпоксидной смоле, он не является завершенным и фактически бронзовые частицы остаются в смоле в подвешенном состоянии. Иными словами, выдавливание смолы из-под частиц не происходит.

Заключение (Conclusion)

Добавка металлического порошка в эпоксидный компаунд не оказывает влияния на значение прочности отрыва эпоксидного компаунда от поверхности алюминиевой бронзы, т. е. осаждение частиц бронзы в эпоксидном компаунде при его отверждении не приводит к уменьшению площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью бронзы. Таким образом, вязкость эпоксидных смол слишком высока, а размеры и масса частиц используемых металлических порошковых наполнителей слишком малы, чтобы имело место хотя бы частичное выжимание смолы из-под частицы при ее медленном погружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители. Модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребенева, И. Ю. Кутергина. — СПб.: ЦОП «Профессия», 2020. — 576 с.
2. Zhang Y. Adhesion of epoxy coating to an alloy-coated steel sheet. Doctor of Philosophy thesis, Department of Materials Engineering, University of Wollongong / Y. Zhang. — 1995. — 255 p.
3. Buketov A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships / A. Buketov, S. Smetankin, P. Maruschak, K. Yurenin, O. Sapronov, V. Matvyeyev, A. Menou // Transport. — 2020. — Vol. 35. — No. 6. — Pp. 679–690. DOI: 10.3846/transport.2020.14286.

4. *Фиактистов Я. О.* Ремонт гребных винтов, изношенных при кавитации, с применением полимерных составов / Я. О. Фиактистов // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России. 22 мая 2019 года / Материалы X межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 279–282.
5. *Георгиевская Е. П.* Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
6. *Цветков Ю. Н.* Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
7. *Кацман Ф. М.* Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.
8. *Пустошный А. В.* Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики / А. В. Пустошный, А. В. Сверчков, С. П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 4 (390). — С. 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.
9. *Schmidt R.* Epoxy adhesion to metals / R. Schmidt, J. Bell // Epoxy Resins and Composites II. Advances in Polymer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. — Vol.75. — Pp. 33–71. DOI: 10.1007/BFb0017914.
10. *Ghanem A.* Introduction to polymer adhesion. — 2017 [Электронный ресурс] / A. Ghanem, Y. Lang. — Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/319098070> (дата обращения: 25.03.2024).
11. *Wei H.* Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings / H. Wei, J. Xia, W. Zhou, L. Zhou, G. Hussain, Q. Li, K. K. Ostrikov // Composites Part B: Engineering. — 2020. — Vol. 193. — Pp. 108035. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108035.
12. *De Bruyne N. A.* The adhesive properties of epoxy resins / N. A. De Bruyne // Journal of Applied Chemistry. — 1956. — Vol. 6. — Is. 7. — Pp. 303–310. DOI: 10.1002/jctb.5010060708.
13. *Салтыков С. А.* Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. — М.: Металлургия, 1976. — 271 с.
14. *Фиактистов Я. О.* Механизм разрушения эпоксидных композитов с металлическим порошковым наполнителем при кавитационном воздействии / Я. О. Фиактистов, Ю. Н. Цветков, Н. С. Зайцева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.
15. *Luo X.* Enhancement of Mechanical Properties and Bonding Properties of Flake-Zinc-Powder-Modified Epoxy Resin Composites / X. Luo, Y. Li, S. Li, X. Liu // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — Is. 24. — Pp. 5323. DOI: 10.3390/polym14235323.
16. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
17. *Yamamoto S.* Molecular size effect on curing process for epoxy and amine mixture / S. Yamamoto, K. Tanaka // Nihon Reorji Gakkaishi. — 2021. — Vol. 49. — Is. 2. — Pp. 55–60. DOI: 10.1678/rheology.49.55.

REFERENCES

1. Chursova, L. V., N. N. Panina, T. A. Grebeneva, and I. Yu. Kutergina. *Epoksidnye smoly, otverditeli. Modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove*. SPb.: TsOP «Professiya», 2020.
2. Zhang, Youlai. Adhesion of epoxy coating to an alloy-coated steel sheet. Doctor of Philosophy thesis, Department of Materials Engineering, University of Wollongong. 1995.
3. Buketov, Andriy, Serhiy Smetankin, Pavlo Maruschak, Kyrlyo Yurenin, Oleksandr Saponov, Viktor Matvyeyev, and Abdellah Menou. “New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships.” *Transport* 35.6 (2020): 679–690. DOI: 10.3846/transport.2020.14286.
4. *Fiaktistov, Ya. O.* “Remont grebnykh vintov, iznoshennykh pri kavitatsii, s primeneniem polimernykh sostavov.” *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii. 22 maya 2019 goda. Materialy X mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 279–282.
5. *Georgievskaya, E. P.* *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei*. L.: Sudostroenie, 1978.
6. *Tsvetkov, Yu. N.* *Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
7. *Katsman, F. M.* *Ekspluatatsiya propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna*. M.: Transport, 1987.
8. *Pustoshny, A. V., A. V. Sverchikov, and S. P. Shevtsov.* “Roughness of propeller blade surface and its implications for propulsion performance.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(390) (2019): 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.

9. Schmidt, Randall G., and James P. Bell. "Epoxy adhesion to metals." *Epoxy Resins and Composites II. Advances in Polymer Science*. Vol. 75. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. 33–71. DOI: 10.1007/BFb0017914.
10. Ghanem, Amyl, and Yujie Lang. "Introduction to polymer adhesion." Web. 25 March 2024 <<https://www.researchgate.net/publication/319098070>>.
11. Wei, Hongyu, Jun Xia, Wanlin Zhou, Laishui Zhou, Ghulam Hussain, Qin Li, and Kostya (Ken) Ostrikov. "Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings." *Composites Part B: Engineering* 193 (2020): 108035. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108035.
12. De Bruyne, N.A. "The adhesive properties of epoxy resins." *Journal of Applied Chemistry* 6.7 (1956): 303–310. DOI: 10.1002/jctb.5010060708.
13. Saltykov, S. A. *Stereometricheskaya metallografiya*. M.: Metallurgiya, 1976.
14. Fiaktistov, Yaroslav O., Yuriy N. Tsvetkov, and Nataliya S. Zaytseva. "Destruction mechanisms of epoxybased composite filled with metal powder under cavitation attack." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.
15. Luo, Xu, Yu Li, Shuaijie Li, and Xin Liu. "Enhancement of mechanical properties and bonding properties of flake-zinc-powder-modified epoxy resin composites." *Polymers* 14.23 (2022): 5323. DOI: 10.3390/polym14235323.
16. Akhmatov, A. S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya*. M.: Fizmatgiz, 1963.
17. Yamamoto, Satoru, and Keiji Tanaka. "Molecular size effect on curing process for epoxy and amine mixture." *Nihon Reoroji Gakkaishi* 49.2 (2021): 55–60. DOI: 10.1678/rheology.49.55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Вихров Николай Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»
198184, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Канонерский остров, 41
e-mail: n.vihrov@inbox.ru
Фиактистов Ярослав Олегович —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yaroslav3373@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov, Yuriy N. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Vihrov, Nikolay M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
JSC "KSZ"
41 Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184,
Russian Federation
e-mail: n.vihrov@inbox.ru
Fiaktistov, Yaroslav O. —
Senior lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yaroslav3373@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2024 г.
Received: April 3, 2024.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-290-300

IMPROVING THE QUALITY OF HEAT DISSIPATION ANALYSIS IN MARINE DIESEL BY CLARIFYING THE UPPER DEAD CENTER POSITION OF THE PISTON

V. V. Gavrilov¹, V. Yu. Mashchenko², V. A. Zhukov¹

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

² — State Marine Technical University of Saint-Petersburg,
St. Petersburg, Russian Federation

It is declared that an increase in the technical, economic and environmental performance of the diesel engine can be achieved by controlling the combustion process of fuel by influencing the parameters of the fuel equipment and combustion chamber. Information about the combustion process is obtained by registering in the experiment and analyzing the indicator diagram. The purpose of the study is to assess the possibility and identify means to improve the quality of the analysis of the combustion process in the ship diesel engine by obtaining reliable characteristics of heat release during fuel combustion as a result of the analysis of indicator diagrams. It is shown that the known methods and means of obtaining heat release characteristics do not provide sufficient analysis accuracy. It is proved that the heat dissipation characteristics can be distorted as a result of an error in determining the ordinate axis on the indicator diagram corresponding to the position of the upper dead center of the piston. A technique for high-precision determination of the upper dead center position, which is determined by dividing in half the time interval between two signals corresponding to the same position of the piston during its ascending and descending motion, is proposed. A device has been developed to implement this technique. Using it in practice makes it possible, by ensuring the necessary accuracy of indicating the upper dead center position on the indicator diagram, to improve the quality of the computational and experimental determination of the heat release characteristics during fuel combustion, which, in turn, allows to provide high technical, economic and environmental performance of the diesel engine during its manufacturing and improve the quality of its diagnosis during operation.

Keywords: in-cylinder processes in diesel engine, analysis of the indicator diagram, dead center of the piston, differential characteristic of heat release.

For citation:

Gavrilov, Vladimir V., Vladimir Yu. Mashchenko, and Vladimir A. Zhukov. "Improving the quality of heat dissipation analysis in marine diesel by clarifying the upper dead center position of the piston." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 290–300. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-290-300.

УДК 62–144:62–977

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АНАЛИЗА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В СУДОВОМ ДИЗЕЛЕ ЗА СЧЕТ УТОЧНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРХНЕЙ МЕРТВОЙ ТОЧКИ ПОРШНЯ

В. В. Гаврилов¹, В. Ю. Мащенко², В. А. Жуков¹

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

² — ФГБОУ ВО «СПбГМТУ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что повышение технико-экономических и экологических показателей дизеля может быть достигнуто с помощью управления процессом горения топлива посредством воздействия на параметры топливной аппаратуры и камеры сгорания. Предлагается информацию о процессе горения получать посредством регистрации в процессе проведения эксперимента двух симметрично расположенных относительно верхней мертвой точки поршня угловых положений коленчатого вала и анализа индикаторной диаграммы. Целью выполненного исследования являлась оценка возможности и определения средств повышения качества анализа процесса горения в судовом дизеле за счет получения достоверных характеристик тепловыделения при горении топлива в результате анализа индикаторных диаграмм. Показано, что известные методы и средства получения характеристик тепловыделения не обеспечивают достаточной точности анализа. В работе доказано, что характеристики тепловыделения могут быть искажены в результате ошибки в определении на индикаторной диаграмме оси ординат, соответствующей положению верхней мертвой точки поршня. Предложена методика высокоточного определения положения верхней мертвой точки, которое получают делением пополам интервала времени между двумя сигналами, соответствующими одному и тому же положению поршня при восходящем и нисходящем его движении. Разработано устройство для реализации указанной методики. Использование предложенной методики на практике позволит за счет обеспечения необходимой точности указания положения верхней мертвой точки на индикаторной диаграмме повысить качество расчетно-экспериментального определения характеристик выделения теплоты при сгорании топлива, что в свою очередь дает возможность обеспечить высокие технико-экономические и экологические показатели дизеля при его создании и повысить качество его диагностирования в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: внутрицилиндровые процессы в дизеле, анализ индикаторной диаграммы, мертвая точка поршня, дифференциальная характеристика тепловыделения.

Для цитирования:

Гаврилов В. В. Повышение качества анализа тепловыделения в судовом дизеле за счет уточнения положения верхней мертвой точки поршня / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 290–300. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-290-300.

Введение (Introduction)

Технико-экономические и экологические показатели судового дизеля находятся в непосредственной зависимости от качества его рабочего процесса, в особенности от качества процесса горения топлива. Весьма полезная информация о процессе горения топлива может быть получена из анализа так называемых *характеристик тепловыделения при горении* [1]. Предпринимаемые многочисленные попытки аналитически связать между собой расходную характеристику впрыскивания топлива (не вполне корректно по традиции называемую *законом подачи топлива*) с характеристикой тепловыделения не дали положительного результата. Причина состоит в том, что параметры и характер протекания сложного комплекса многостадийного процесса горения топлива в дизеле зависит от большого числа конструктивных и эксплуатационных факторов. В настоящее время отсутствует возможность при помощи математической модели достаточно адекватно описать химические реакции преобразования топлива и процессы, лимитирующие скорость реакций. Между тем важно располагать возможностью получения достоверных характеристик тепловыделения.

Цель исследования состоит в оценке возможности и определении средств повышения качества анализа рабочего процесса судового дизеля за счет получения достоверных характеристик тепловыделения при горении топлива.

Адекватное описание тепловыделения необходимо не только на стадии доводки рабочего процесса вновь создаваемого дизеля, но и для решения многих иных задач, например, для проверки точности математического моделирования внутрицилиндровых процессов в дизеле, его диагностирования в ходе эксплуатации и других задач [2], [3]. Повышение точности определения характеристик тепловыделения в ДВС сохраняет актуальность при переводе двигателей на газовое топливо, о чем свидетельствуют исследования [4], [5].

При индицировании рабочего процесса выполняют два независимых друг от друга измерения: текущего давления в рабочем цилиндре и положения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня

на индикаторной диаграмме (ИД). Ошибка в определении ВМТ может оказать влияние на достоверность получаемой в результате анализа диаграммы характеристик тепловыделения [6]. Между тем результаты исследований показали, что на практике при использовании известных методов и средств определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме ошибка измерений зачастую находится в диапазоне от $-2,0$ до $+2,0$ град. поворота коленчатого вала ($^{\circ}$ п. к. в.) [7]. Достоверность математического определения положения ВМТ, в частности посредством анализа кривых давления сжатия и расширения на индикаторной диаграмме, записанной при отключении подачи топлива в цилиндр [8], [9], на наш взгляд, не определена достаточно строго.

С учетом ранее изложенного для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить, насколько существенным является влияние погрешности в определении положения ВМТ, указанной на индикаторной диаграмме, на характеристики тепловыделения при горении топлива;
- предложить методику и средство обеспечения приемлемой погрешности при определении положения ВМТ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Теоретические основы вычисления характеристик тепловыделения на базе индикаторной диаграммы (решение так называемой *обратной задачи расчета рабочего процесса в дизеле*), выполняемые с использованием функций Вибе [10], подробно рассмотрены в работе [11]. Методика расчета, реализуемая в процессе проведения исследований на основе использования данных теоретических положений, изложена в работах [1], [3]. Вид характеристик тепловыделения приведен на рис. 1 [1]. Наряду с указанными характеристиками в результате обработки ИД получают ряд важных параметров диаграмм, отражающих те или иные свойства рабочего процесса дизеля.

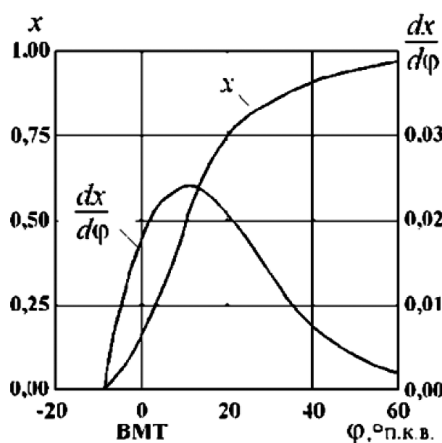


Рис. 1. Упрощенный вид характеристик тепловыделения при горении топлива в дизеле

Fig. 1. A simplified view of the heat release characteristics during fuel combustion in the diesel engine

Характеристики тепловыделения в рабочем цикле дизеля оказывают определяющее влияние как на экологические, так и на экономические показатели двигателя [12]–[14], поэтому их анализу уделяется столь пристальное внимание. При описании процесса горения обычно используют две приведенные на рис. 1 разновидности характеристик: во-первых, *интегральную характеристику тепловыделения*, представляющую собой функцию количества теплоты Q , кДж, выделившейся в цилиндре дизеля, от угла поворота коленчатого вала $Q = f(\varphi)$ или времени $Q = f(\tau)$, во-вторых, *дифференциальную характеристику тепловыделения* $dQ/d\varphi = f(\varphi)$ — характеристику интенсив-

ности тепловыделения (так называемой *скорости тепловыделения*) [4]. Как правило, используют характеристики не абсолютного, а относительного тепловыделения, которые получают делением текущих значений $Q(\varphi)$ на теплоту $Q_{ц}$, выделившуюся при сгорании цикловой дозы $g_{ц}$, кг/цикл, поданного в цилиндр топлива (цикловой подачи): $x(\varphi) = Q(\varphi) / Q_{ц}$. Заметим, что $Q_{ц} = g_{ц} Q_{н}$, где $Q_{н}$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг. В этом случае характеристика относительной скорости тепловыделения $dx / d\varphi = f(\varphi)$.

Выделившаяся при горении теплота представляет собой сумму двух составляющих: теплоты, теряемой из цикла за счет теплопередачи через стенки рабочего цилиндра, и теплоты, направленной на совершение полезной работы и повышение внутренней энергии заряда цилиндра. Первую составляющую определяем по методике Эйхельберга, вторую, названную авторами данной работы (Прим. ред.) *располагаемой теплотой*, получаем посредством обработки и анализа ИД. Характеристики относительной выделившейся теплоты x , относительной располагаемой теплоты x_i и относительной теплоты потерь x_w показаны на рис. 2, где линия $x = f(\varphi)$ в процессе горения асимптотически приближается к единице, но не достигает ее. Это объясняется тем, что окончанием периода сгорания топлива $\varphi_{сгор}$ повсеместно принято считать момент достижения x значения 0,98–0,99.

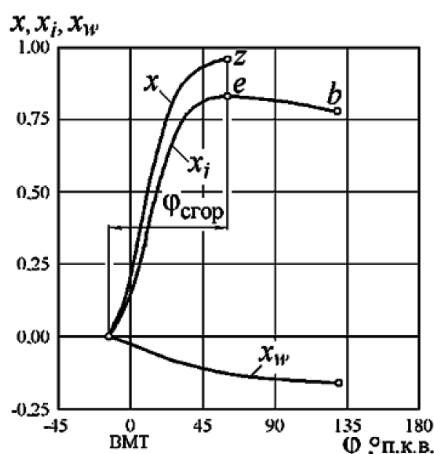


Рис. 2. Характеристики выделившейся и располагаемой теплоты, а также тепловых потерь при горении топлива в дизеле
Fig. 2. Characteristics of released and available heat, as well as heat losses during fuel combustion in the diesel engine

Для решения первой из сформулированных в работе задач были получены в экспериментах, проводимых на дизеле 6ЧН30/38 (2Д42), *многоцикловые индикаторные диаграммы* с использованием индикатора МАИ-2. Режим работы дизеля соответствовал цикловой подаче топлива $g_{ц} = 0,0014$ кг/цикл при частоте вращения коленчатого вала 715 мин^{-1} . Для имитации ошибки в определении положения ВМТ на ИД при анализе диаграмма искусственно смещалась относительно исходного положения на $-2,0$ и $+2,0^\circ$ п. к. в. Было принято, что в исходной ИД положение ВМТ определено без ошибки.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Рассмотрим результат исследования, приведенный на рис. 3, который позволяет определить, насколько существенно искажаются характеристики тепловыделения при смещении положения ВМТ на ИД в указанных ранее пределах (от $-2,0$ до $+2,0^\circ$ п. к. в.). Кривые тепловыделения, обозначенные сплошной линией, относятся к исходной ИД, для которой принято, что положение ВМТ указано достаточно точно. Следует обратить внимание на то, что в данном случае линия $x = f(\varphi)$ к моменту окончания горения приближается к единице, что свидетельствует о достоверности результата регистрации и обработки исходной ИД.

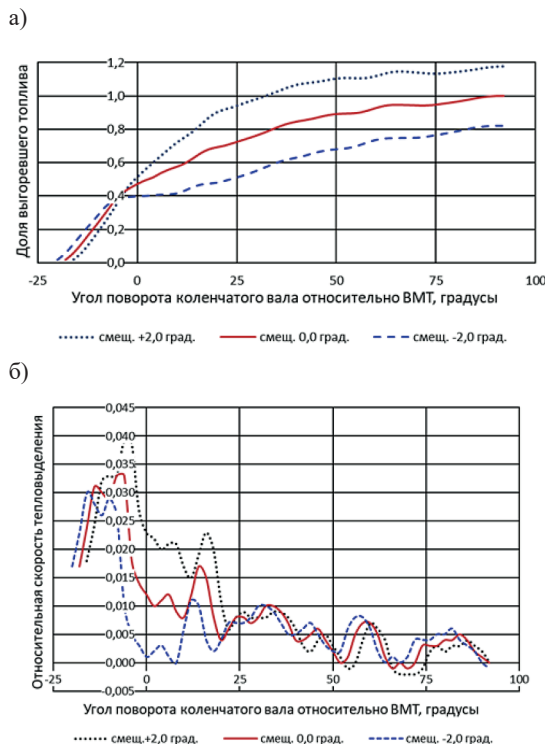


Рис. 3. Характеристики тепловыделения при сгорании топлива в дизеле:
а — интегральная характеристика; б — дифференциальная характеристика
Fig. 3. Characteristics of heat release during fuel combustion in the diesel engine:
а — integral characteristic; б — differential characteristic

При расчете двух других вариантов характеристик тепловыделения положение ВМТ на диаграмме искусственно смещено на $-2,0$ и $+2,0^\circ$ п. к. в. относительно исходного варианта. Из рис. 3 видно, насколько значительно различаются интегральные характеристики тепловыделения. При смещении ИД на -2° среднее индикаторное давление p_i составляет всего 82 % исходного варианта, при смещении ИД на $+2^\circ$ p_i увеличивается на 24 %. Соответственно указанным значениям изменяется рассчитанная по ИД индикаторная мощность двигателя. Также значительно различаются дифференциальные характеристики тепловыделения: при смещении ИД на -2° максимум относительной скорости тепловыделения $dx/d\varphi$ снижается с 0,033 до 0,029 и его положение изменяется с -7° до -10° ; при смещении ИД на $+2^\circ$ максимум $dx/d\varphi$ увеличивается с 0,033 до 0,039 и его положение изменяется с -7° до -5° . Указанные отклонения от исходного варианта свидетельствуют о значительной ошибке в оценке жесткости процесса сгорания. Кроме того, при смещении ИД на -2° скорость тепловыделения $dx/d\varphi$ оказалась нулевой уже при 8° после ВМТ, что, разумеется, не соответствует действительности.

Таким образом, в проведенном исследовании доказано, что ошибка в определении ВМТ на индикаторной диаграмме оказывает весьма существенное влияние на качество анализа тепловыделения при сгорании топлива в дизельном двигателе. Вместе с тем реально существующая погрешность в определении ВМТ на ИД в пределах $\pm 2,0$ град. ПКВ [3] не позволяет на практике достаточно успешно решать задачи доводки рабочего процесса двигателя и задачи его диагностирования. Укажем возможные основные причины столь существенной погрешности. Датчик отметчика ВМТ, сигнал которого подается на ИД, как правило, устанавливают на маховике коленчатого вала двигателя в положении, соответствующем ВМТ поршня. Обеспечение необходимой высокой точности фиксирования указанного положения коленчатого вала представляет собой трудную задачу. Дополнительные сложности вызывают искажения, вносимые измерительной системой при передаче и регистрации сигнала датчика. Эти обстоятельства и вызывают отмеченную значительную погрешность в определении ВМТ на ИД.

На базе проведенного исследования принято решение разработать методику высокоточного определения положения ВМТ поршня на ИД, в основе которой заложен следующий принцип: вместо формирования одного сигнала, соответствующего ВМТ поршня, формируется пара сигналов, соответствующих некоторому промежуточному положению поршня при его движении до и после ВМТ. Положение ВМТ на ИД определяется при помощи «программного» деления пополам отрезка между указанными сигналами. Преимущество предложенной методики определяется на основе анализа рис. 4.

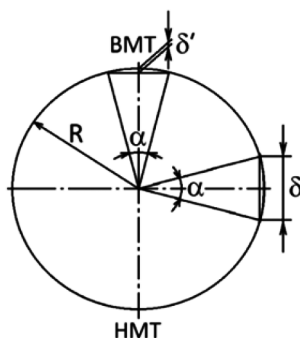


Рис. 4. Графическое обоснование методики определения ВМТ поршня двигателя на индикаторной диаграмме

Fig. 4. Graphic substantiation of the method for determining the upper dead center of the engine piston on the indicator diagram

Для обеспечения угловой погрешности в определении ВМТ на ИД $\pm \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ абсолютная погрешность определения линейного положения поршня в окрестности его ВМТ должна быть в пределах δ' (высота сегмента круга в секторе углового размера α). В случае регистрации текущего положения поршня, например, при 90 град. до или после его ВМТ угловая погрешность в определении ВМТ на ИД $\pm \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ может быть обеспечена при абсолютной погрешности δ (длина хорды окружности в секторе углового размера α). Наглядно показано, что допустимая погрешность измерения текущего положения поршня при его значительном отклонении от ВМТ многократно выше, чем при измерении его положения в окрестности ВМТ. Реализация предложенного принципа обеспечивает возможность существенного повышения точности определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме и, соответственно, качества анализа внутрицилиндровых процессов в двигателе.

Для количественной оценки преимущества предложенного способа определения положения ВМТ на ИД на основе регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала выполнен соответствующий расчет. Рассмотрим случай, когда необходимо рассчитать допустимую погрешность в измерении положения поршня, при которой обеспечена погрешность определения углового положения ВМТ в пределах $\pm 2,0^\circ$ п. к. в. При традиционном способе определения ВМТ (по результатам измерений перемещения поршня в окрестности его ВМТ, точнее, фиксации его положения при «нулевом перемещении» относительно ВМТ) допустимая погрешность рассчитывается по следующей формуле высоты сегмента круга в секторе углового размера α :

$$\delta' = R \left[1 - \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad (1)$$

где R — радиус окружности (радиус кривошипа в двигателе).

Расчет для предложенной методики определения ВМТ (по регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала) выполнен применительно к угловому положению кривошипно-шатунного механизма 90° п. к. в. до ВМТ

(или 90° п. к. в. после ВМТ). Использована следующая формула длины хорды окружности в секторе углового размера:

$$\delta = 2R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (2)$$

В результате расчетов оказалось, что для исследованного случая (обеспечение возможности определения положения ВМТ на ИД с погрешностью $\pm 2,0^\circ$ п. к. в., т. е. при $\alpha = 4^\circ$ п. к. в.) отношение допустимых погрешностей измерений положения поршня составило

$$\frac{\delta'}{\delta} = \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{4}{2}\right)\right]}{2 \sin\left(\frac{4}{2}\right)} = \frac{(1 - 0,999)}{2 \cdot 0,035} = 0,0087.$$

Выполненный расчет позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме на основе регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала имеет явное преимущество по сравнению с традиционным способом фиксирования положения коленчатого вала, соответствующего положению ВМТ. Для уменьшения погрешности определения ВМТ на ИД наряду с использованием решения методического характера, а именно описанной в данной работе методики определения ВМТ посредством регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала, необходимо применить некоторые инструментальные средства. Широко известные отметчики ВМТ, основанные на использовании индуктивных датчиков, обладают недостаточно высокой точностью преобразования сигнала. В связи с этим могут быть предложены иные современные средства, например, вихретоковые преобразователи [15] или энкодеры [16], [17], обеспечивающие высокую точность измерений.

Рассмотрим методику практического определения ВМТ на основе предложенного в работе принципа регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала. Для выполнения регистрации двигатель должен быть предварительно оснащен некоторыми элементами измерительной системы (рис. 5).

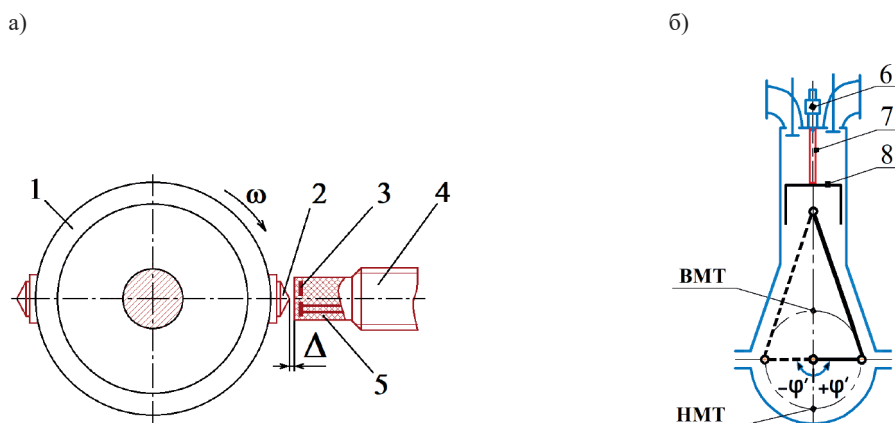


Рис. 5. Элементы измерительной системы для регистрации углового положения ВМТ поршня:

- a* — расположение элементов измерительной системы для определения положения ВМТ;
б — способ определения симметричных положений коленчатого вала относительно ВМТ поршня;
 1 — маховик коленчатого вала; 2 — сигнальный буртик; 3 — плоская катушка индуктивности;
 4 — корпус вихретокового преобразователя; 5 — диэлектрический наполнитель; 6 — корпус форсунки;
 7 — штанга-шаблон (закреплена в корпусе форсунки); 8 — поршень

Fig. 5. Elements of the measuring system for recording the angular position of the piston upper dead center:

- a* — arrangement of measuring system elements to determine the upper dead center position;
b — method for determining the symmetrical positions of the crankshaft relative to the piston upper dead center;
 1 — crankshaft flywheel; 2 — signal collar; 3 — flat inductor; 4 — eddy current probe housing;
 5 — dielectric filler; 6 — injector body; 7 — rod-template (it is fixed in the injector body); 8 — piston

На маховике коленчатого вала 1 закреплены два сигнальных буртика 2 (с возможностью изменения их положения в окружном направлении по цилиндрической поверхности маховика). Вихретоковый преобразователь, содержащий корпус 4, плоскую катушку 3 и диэлектрический наполнитель 5, закреплен неподвижно на остоле двигателя с образованием измеряемого зазора Δ . Буртики 2 размещены на маховике 1 так, что при их движении мимо вихретокового преобразователя в измерительной системе вырабатывается пара сигналов, симметрично расположенных относительно положения ВМТ поршня на расстояниях $+\varphi$ и $-\varphi$, ° п. к. в. На рис. 5 показан частный случай, в котором $\varphi = \pm 90$ ° п. к. в.

Очевидно, что необходимо решить вопрос о размещении буртиков 2 на маховике 1 так, чтобы при работе двигателя (при измерениях) они давали пару сигналов, симметрично расположенных относительно ВМТ поршня. Для этого можно использовать способ, приведенный на рис. 5, б, который заключается в следующем. В корпусе форсунки 6 закрепляют неподвижно штангу-шаблон 7. Вручную проворачивают коленчатый вал двигателя в направлении от НМТ на угол $+\varphi'$ до упора поршня 8 в штангу-шаблон. На маховике двигателя закрепляют первый (из двух) сигнальный буртик 2 (см. рис. 5, а) в положении, соответствующем оси вихретокового преобразователя 4. Далее проворачивают коленчатый вал в обратном направлении от НМТ на угол $-\varphi'$ также до упора поршня в штангу-шаблон. Закрепляют на маховике двигателя второй сигнальный буртик на оси вихретокового преобразователя 4. Следует отметить, что на рисунке показан частный случай, в котором $\pm\varphi' = |90|$ ° п. к. в. Указанный угол следует принять несколько меньшим указанного значения 90°, чтобы на осциллограмме работы измерительной системы можно было проще выделить ту пару сигналов, между которыми размещена искомая ВМТ поршня.

Предложенная методика определения положения ВМТ поршня предназначена для использования преимущественно на стадии доводочных испытаний дизеля. При этом испытывают дизель, оснащая его различными вариантами сочетаний опытных деталей, принципиально важные параметры которых предварительно выбраны зачастую расчетным способом. Наиболее существенное влияние на показатели рабочего процесса судового дизеля оказывают сочетания конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения высоких технико-экономических и экологических показателей судового дизеля в процессе его создания и эксплуатации необходимо располагать характеристиками тепловыделения при сгорании топлива. Указанные характеристики получают путем регистрации и анализа индикаторных диаграмм. Проведенный эксперимент показал, что вид и параметры характеристик в весьма существенной степени зависят от точности определения положения ВМТ поршня на диаграмме.

2. Известные современные технические средства и аналитические методы не обеспечивают получения необходимой точности определения ВМТ. В целях повышения указанной точности в работе предложена методика, в соответствии с которой в измерительной системе вместо повсеместно принятого формирования сигнала, соответствующего ВМТ поршня, формируется пара сигналов, соответствующих некоторому промежуточному положению поршня при движении до и после ВМТ. Положение ВМТ на индикаторной диаграмме определяется путем «программного» деления пополам отрезка между указанными сигналами.

3. Разработан способ реализации указанной методики с использованием измерительной системы, построенной с применением вихретокового преобразователя. Способ заключается в настраивании измерительной системы при двух фиксированных положениях кривошипно-шатунного механизма двигателя, соответствующих одному положению поршня относительно крышки цилиндра до и после ВМТ, регистрации двух сигналов, соответствующих указанным положениям, и делении пополам отрезка осциллограммы между этими двумя сигналами.

4. Применение предложенной методики и технического средства ее реализации позволит за счет обеспечения необходимой точности определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме повысить качество расчетно-экспериментального построения характеристик выделения теплоты при сгорании топлива, что в свою очередь повысит качество доводки рабочего процесса дизеля при его создании и качество его диагностирования в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаврилов В. В.* Анализ процесса горения в судовом дизеле по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 62 с.
2. *Гаврилов В. В.* Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
3. *Гаврилов В. В.* Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.
4. *Ларионов Л. Б.* Расчет процесса сгорания биогаза в газовом двигателе с искровым зажиганием, конвертированном из дизеля с наддувом / Л. Б. Ларионов, М. К. Бураев // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. — 2015. — Т. 12. — № 1. — С. 52–28.
5. *Смоленская Н. М.* Зависимость характеристики тепловыделения от состава смеси на холостом ходу в двигателе, работающем на газовом топливе / Н. М. Смоленская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2017. — Т. 17. — № 4. — С. 26–37. DOI: 10.14529/engn170403.
6. *Гаврилов В. В.* Влияние основных факторов на качество анализа тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, А. А. Матикайнен // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — СПб.: СПбГМТУ, 2021. — № 1–1. — № 94.
7. *Лашко В. А.* Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчетно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1 (4). — С. 57–68.
8. *Обозов А. А.* Разработка теоретических основ и средств повышения эффективности систем технического диагностирования малооборотных дизелей: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Обозов. — Брянск: ЗАО «УК «БМЗ», 2010. — 425 с.
9. *Лашко В. А.* Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Двигателестроение. — 2007. — № 3 (229). — С. 34–38.
10. *Wibe I. I.* Brennvtrlauf und Kreisprozessevon Verbrennungsmotoren / I. I. Wibe. — Berlin: VEB Verlag Technik, 1970. — 280 p.
11. *Кавтарадзе Р. З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Бауман, 2016. — 589 с.
12. *Luo Q.* Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine / Q. H. Luo, J. B. Hu, B. G. Sun, F. S. Liu, X. Wang, C. Li, L. Z. Bao // International journal of hydrogen energy. — 2019. — Vol. 44. — Is. 11. — Pp. 5573–5584. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.184.
13. *Cao J.* Establishment of an improved heat transfer model based on an enhanced thermal wall function for internal combustion engines operated under different combustion modes / J. Cao, M. Jia, B. Niu, Y. Chang, Z. Xu, H. Liu // Energy conversion and management. — 2019. — Vol. 195. — Pp. 748–759. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.05.046.
14. *Dahham R. Y.* Improving thermal efficiency of internal combustion engines: recent progress and remaining challenges / R. Y. Dahham, H. Wei, J. Pan // Energies. — 2022. — Vol. 15. — Is. 17. — Pp. 6222. DOI: 10.3390/en15176222.

15. Куличенков В. П. Системы и устройства контроля механических параметров турбоагрегатов / В. П. Куличенков, В. В. Саранцев, А. А. Чепуркин. — Минск: БНТУ, 2015. — 133 с.
16. Энкодеры — принцип работы, виды и основное применение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://masterservisnsk.ru/elektronika/enkoder-princip-raboty.html> (дата обращения: 09.08.2023).
17. К вопросу о точности угловых энкодеров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf> (дата обращения 09.08.2023).

REFERENCES

1. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. *Analiz protsessa gorenija v sudovom dizele po indikatornym diagrammam*. SPb.: SPbGMTU, 2015.
2. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. "Principles of hierarchical complex systems of diagnosing marine diesel engine." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
3. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. "Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.
4. Larionov, L. B., and M. K. Burayev. "Calculation of process of combustion of biogaz in the gas engine with spark ignition converted from the diesel with pressurization." *Vestnik of the North-Eastern Federal University* 12.1 (2015): 52–28.
5. Smolenskaya, N. M. "Dependence of characteristics of heat exchange from mixture of mixture on dry walk in engine working on gas fuel." *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry* 17.4 (2017): 26–37. DOI: 10.14529/engin170403.
6. Gavrilov, V. V., V. Y. Mashenko, and A. A. Mitikainen. "The influence of the main factors on the quality of the analysis of heat release in diesel according to indicator diagrams." *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta*. № 1–1. SPb.: SPbGMTU, 2021.
7. Lashko, V. A., A. Y. Konkov, and A. A. Markelov. "The method of technical condition identification for a diesel engine by the display diagram analysis under the condition of ordinary operation." *Bulletin of PNU* 1(4) (2007): 57–68.
8. Obozov, A. A. *Razrabotka teoreticheskikh osnov i sredstv povysheniya effektivnosti sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya malooborotnykh dizelei*. PhD diss. Bryansk: ZAO «UK «BMZ», 2010.
9. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Analytical correction of actual TDC position as defined from engine indicator diagram." *Dvigatestroyeniye* 3(229) (2007): 34–38.
10. Wibe, I. I. *Brennvtrlaufund Kreisprozesse von Verbrennungsmotoren*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970.
11. Kavtaradze, R. Z. *Teoriya porshnevykh dvigatelei. Spetsial'nye glavy*. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2016.
12. Luo, Qing-he, Ji-Bin Hu, Bai-gang Sun, Fu-shui Liu, Xi Wang, Chao Li, and Ling-zhi Bao. "Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine." *International journal of hydrogen energy* 44.11 (2019): 5573–5584. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.184.
13. Cao, Jingjie, Ming Jia, Bo Niu, Yachao Chang, Zhen Xu, and Hong Liu. "Establishment of an improved heat transfer model based on an enhanced thermal wall function for internal combustion engines operated under different combustion modes." *Energy conversion and management* 195 (2019): 748–759. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.05.046.
14. Dahham, Rami Y., Haiqiao Wei, and Jiaying Pan. "Improving thermal efficiency of internal combustion engines: recent progress and remaining challenges." *Energies* 15.17 (2022): 6222. DOI: 10.3390/en15176222
15. Kulichenkov, V. P., V. V. Sarantsev, and A. A. Chepurkin. *Sistemy i ustroistva kontrolya mekhanicheskikh parametrov turbo-agregatov*. Minsk: BNTU, 2015.
16. Enkodery — printsip raboty, vidy i osnovnoe primenenie. Web. 9 Aug. 2023 <<https://masterservisnsk.ru/elektronika/enkoder-princip-raboty.html>>.
17. K voprosu o tochnosti uglovykh enkoderov. Web. 9 Aug. 2023 <<https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов 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: vgavrilov47@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Машенко Владимир Юрьевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»

190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Жуков Владимир Анатольевич —

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

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

e-mail: zhukov_vla@mail.ru, zhukovva@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gavrilov, 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: vgavrilov47@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Mashchenko, Vladimir Yu. —

PhD, associate professor
State Marine Technical University of Saint-Petersburg

3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Zhukov, Vladimir A. —

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

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

e-mail: zhukov_vla@mail.ru, zhukovva@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2024 г.

Received: April 1, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-301-317

ENERGY EFFICIENCY OF MODERN COMMERCIAL FLEET VESSELS: REGULATORY TOOLS AND METHODS OF ACHIEVEMENT

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

Negative climatic changes, expressed in an increase in average annual temperatures on the planet and associated with saturation of the lower atmosphere with greenhouse gases, force measures to reduce the anthropogenic factor of influence on these processes and the development of methods and regulatory tools. Despite the fact that marine transportation due to the burning of fossil hydrocarbons accounts for less than 2.5 % of total carbon dioxide emissions, in the long term, the accumulation effect can have serious consequences. The subject of this study is the energy efficiency of ships of the modern commercial fleet. The various regulatory requirements for energy efficiency are considered in the paper and the chronology of the requirements introduction at both international and regional levels is tracked. It is noted that the developed methods of energy efficiency assessment are aimed at reducing the measure of the anthropogenic factor influence on the greenhouse effect and that energy efficiency estimates are mainly based on monitoring carbon dioxide emissions when engines run on various types of fuels. The focus in the study is on measures to reduce CO₂ emissions at all stages of the ship life cycle, from design and construction to ship recycling. Among the measures to reduce emissions at the design and construction stage, the issues of optimizing the ship hull and its power plant, developing structures for working on non-traditional, carbon-neutral and carbon-free fuels, and introducing alternative energy sources into the design of a ship power plant, etc. are discussed. Among the operational measures to reduce CO₂ emissions, the problems of optimizing the speed and routes of transportation, the vessel loading, and operating modes of ship equipment are considered. The problems that arise in the way of implementing technologies to achieve the requirements for ships energy efficiency are considered in the paper. Based on the analysis of various methods for reducing the measure of impact on the greenhouse effect from the global shipping industry, the conclusions on the results achieved and their effectiveness are drawn.

Keywords: energy efficiency of ships, marine power plant, environmental safety, greenhouse gas emissions, energy efficiency standards.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Energy efficiency of modern commercial fleet vessels: regulatory tools and methods of achievement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 301–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-301-317.

УДК 621.43.074

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВ СОВРЕМЕННОГО КОММЕРЧЕСКОГО ФЛОТА: ИНСТРУМЕНТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

В работе обращается внимание на то, что негативные климатические изменения, выраженные в повышении среднегодовых температур на планете и связанные с насыщением нижних слоев атмосферы парниковыми газами, вынуждают к принятию мер по сокращению антропогенного фактора влияния на эти процессы и разработке методик и инструментов регулирования. Отмечается, что несмотря на то, что на морские транспортные перевозки за счет сжигания ископаемых углеводородов приходится менее 2,5 % от суммарных выбросов диоксида углерода, в перспективе эффект накопления способен повлечь серьезные последствия. Предметом настоящего исследования является энергоэффективность судов

современного коммерческого флота. В работе рассмотрены различные нормативные требования по энергоэффективности, отслежена хронология введения требований как международного, так и регионального уровней. Отмечается, что разработанные методы оценки энергоэффективности направлены на сокращение меры влияния антропогенного фактора на парниковый эффект и оценки энергоэффективности в основном базируются на мониторинге выбросов диоксида углерода при работе двигателей на различных видах топлива. В исследовании уделено внимание мероприятиям по сокращению выбросов CO_2 на всех этапах жизненного цикла судов, начиная с проектирования и постройки до утилизации судна. В числе мероприятий по сокращению выбросов на этапе проектирования и постройки рассмотрены вопросы оптимизации корпуса судна и его энергетической установки, разработки конструкций для работы на нетрадиционных, углерод-нейтральных и безуглеродных видах топлива, внедрение в конструкцию судовой энергетической установки альтернативных источников энергии и др. Среди эксплуатационных мер снижения выбросов CO_2 рассмотрены проблемы оптимизации скорости и маршрутов перевозок, загрузки судна, режимов работы судового оборудования. В работе также уделено внимание проблемам, возникающим в процессе внедрения технологий достижения требований к энергоэффективности судов. На основании анализа различных методов сокращения степени влияния на парниковый эффект со стороны мировой судоходной отрасли сделаны выводы о достигнутых результатах и их эффективности.

Ключевые слова: энергоэффективность судов, судовая энергетическая установка, экологическая безопасность, выбросы парниковых газов, регулирование энергоэффективности.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Энергоэффективность судов современного коммерческого флота: инструменты регулирования и методы достижения / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 301–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-301-317.

Введение (Introduction)

Наблюдающиеся тенденции негативных климатических изменений отражают неуклонный рост уровня среднегодовых температур на планете. Достигнутый среднетемпературный максимум в $17,24^\circ\text{C}$ вызывает серьезную озабоченность и несмотря на то, что всемирное потепление является достаточно медленным и постепенным процессом, долгосрочные последствия могут оказаться катастрофическими. Одной из наиболее известных общепризнанных причин разогрева поверхности и нижних слоев атмосферы Земли является насыщение атмосферы парниковыми газами, особенно диоксидом углерода CO_2 . Наряду с естественными источниками выбросов CO_2 антропогенный фактор, выраженный в сжигании ископаемых углеводородов, вносит свой вклад в создание парникового эффекта. В работе [1] отмечается, что основным потребителем ископаемых углеводородов является транспортная инфраструктура, на которую приходится около 65 % потребления нефтепродуктов. При этом на международные морские перевозки приходится до 78 % объема мировой торговли, а выбросы в этом секторе составляют около 2,4 % глобальных выбросов парниковых газов. Несмотря на то, что указанные значения выбросов могут показаться незначительными, если не предпринять соответствующих мер сдерживания, то по прогнозам их увеличение с 2012 по 2050 гг. вместе с сегментом транспортных услуг возрастет пятикратно [2], [3].

Решение проблем сокращения меры антропогенного влияния на парниковый эффект со стороны водного транспорта представляется не только в попытках использования безуглеродных или углерод-нейтральных топлив, но и в повышении энергоэффективности судовых систем и в целом производительности судов при осуществлении перевозок. Рост производительности означает меньший уровень выбросов при одновременном сокращении расходов топлива. Возможная экономия топлива варьируется в пределах 25–75 % и может быть достигнута за счет более эффективной эксплуатации существующих и рационального проектирования новых судов [4].

За последние десятилетия правительствами различных стран создано несколько проектов и организаций, ответственных за решение указанных проблем. В первую очередь следует отметить Международную морскую организацию (ИМО), которая в 2011 г. ввела индекс энергоэффективности — EEDI, который впоследствии был усовершенствован и дополнен [5]. Несмотря на принимаемые многочисленные попытки [6]–[8] оценки энергоэффективности независимо от выбросов CO_2 с непосредственным учетом расхода топлива, который может составлять до 50–

60 % общих затрат на эксплуатацию судов, общепринятый EEDI, позиционируемый как «показатель энергоэффективности», фактически является измерением выбросов CO₂, что опосредованно связано с энергоэффективностью. Кроме того, EEDI оценивает лишь часть энергетической системы судна и только в одной рабочей точке, поэтому такая оценка энергоэффективности не может быть полной и всеобъемлющей [9]. Это является общей проблемой и для других нормативных актов, которые практически исключительно отслеживают энергоэффективность с точки зрения выбросов CO₂, и такой подход делает изучение энергоэффективности сложным процессом. Таким образом, отсутствие единой нормативной документации в вопросах изучения и обеспечения соблюдения норм энергоэффективности для всех классов и типов судов существенно затрудняет оценки и достижение высокой энергоэффективности морских перевозок, одновременно сводя к минимуму эффективность многих принимаемых решений.

Цель настоящей работы предусматривает исследование текущего состояния проблем энергоэффективности судов по следующим основным направлениям:

- состояние законодательной и нормативной базы, влияющей на энергоэффективность;
- обзор усилий и достижений, направленных на повышение энергоэффективности за последнее десятилетие;
- рассмотрение отдельных предложений по повышению энергоэффективности всего сектора морского транспорта и выделение потенциальных препятствий, которые могут образоваться при реализации таких мероприятий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нормативно-правовая база. Следует отметить, что до настоящего времени не существует единого норматива, непосредственно касающегося энергоэффективности судов как основной концепции регулирования. Существующие правила, регламентирующие энергоэффективность судов, не являются автономными и в значительной мере зависят от заинтересованных структур. Примером может служить EEDI, применение которого является некорректным для некоторых типов судов, и его метод оценки оказывается не вполне адекватным в случае использования в составе судовой энергетической установки специфических энергетических систем. Исходя из этого, следует определиться с происхождением и основными задачами действующего норматива, базирующегося на исследованиях в области энергоэффективности. В табл. 1 показана хронология создания наиболее важных мер и требований ИМО как головной организации, генерирующей и внедряющей требования и нормативы.

Таблица 1

Хронология правил ИМО

Дата	Описание
1948 г.	Создание в Женеве Межправительственной морской консультативной организации ИМКО, преобразованной в дальнейшем в Международную морскую организацию ИМО.
1958 г.	Организация вступает в силу.
1967 г.	Катастрофа в каньоне Торри демонстрирует масштабы проблем загрязнения, особенно при транспортировке нефти, как побуждающий мотив к формированию общих нормативов и требований экологической безопасности морских перевозок.
1973 г.	Разработана и принимается к реализации самая большая программа по предотвращению загрязнений — Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL).
1978 г.	Внесение поправок и дополнение Приложениями конвенции MARPOL (MARPOL 73/78)
1997 г.	Протокол MARPOL 73/78 утвержден с положениями о загрязнении, в том числе о разливе грузов, сточных водах и загрязнении воздуха.
Май 2005 г.	Конвенция MARPOL 73/78 вступает в полную силу
Апрель 2009 г.	Первое упоминание проектного индекса энергоэффективности и эксплуатационного индекса энергоэффективности в целях минимизации выбросов парниковых газов в МЕРС 59.

Таблица 1
(Окончание)

Август 2009 г.	Инициировано распространение Руководства по добровольному использованию эксплуатационного индекса энергоэффективности.
Июль 2011 г.	Соответствие установленного уровня EEDI становится необходимым для любых новых судов, под которыми понимаются все суда, контракт на которые заключается после 01.01.2013 г., которые вступают в стадию строительства после июля 2013 г. или принятые в эксплуатацию после июля 2015 г.
Октябрь 2016 г.	Начало внедрения ИМО Системы сбора данных DCS (MEPC 70), позволяющей контролировать расход топлива и другие показатели работы водного транспорта.
Март 2018 г.	Система DCS вступает в полную силу.
Январь 2019 г.	Начало первого отчетного периода системы DCS.
Ноябрь 2020 г.	На 75-й сессии комитета MEPC вводится коэффициент оценки энергоэффективности всех эксплуатируемых судов, вне зависимости от даты постройки как расширение EEDI для помощи в оценке энергоэффективности судов, построенных до 2013 г.

Рассматривая правовую деятельность ИМО, необходимо упомянуть другие соглашения, которые напрямую не касаются энергоэффективности, но способны накладывать ограничения на разработку энергоэффективных судовых систем. К ним относятся: Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ), Конвенция о противообрастающих системах (AFS 2001), Конвенция об управлении балластными водами для предотвращения вторжения чужеродных видов (BMW 2004) и др. Таким образом, являясь основным разработчиком принятых конвенций, ИМО оказывается наиболее компетентной организацией, отвечающей за управление энергоэффективностью морского транспорта. Роль ИМО заключается в создании для судовладельцев равных условий, обеспечивающих решение проблем без угрозы безопасности персонала, конструкции судна или окружающей среды, способствуя инновациям и эффективности.

Основной международной конвенцией, касающейся предотвращения загрязнения морской среды как по эксплуатационным, так и по иным (в частности, аварийным причинам), является Международная конвенция по предотвращению загрязнений с судов (МАРПОЛ) — документ, который был первоначально создан в 1973 г. и обновлен в 1978 г. Объединенный документ вступил в силу в 1983 г., но все предложенные правила начали применяться в полную силу только после 2005 г. Структура конвенции представляет собой ряд правил, разделенных на шесть технических приложений с конкретными инструкциями. Наиболее важной частью МАРПОЛ в отношении энергоэффективности является Прил. VI «Предотвращение загрязнения воздуха с судов», которое с 2011 г. охватывает обязательные технические и эксплуатационные меры по повышению энергоэффективности, направленные на сокращение выбросов парниковых газов.

Рассмотрим основные инструменты регулирования энергоэффективности судов и их характеристики, значимые для данного исследования.

1. Наиболее важной технической мерой для новых судов является *индекс энергоэффективности (EEDI)*, принятый в базовом эталонном значении в 2013 г. Основная функция EEDI состоит в содействии использованию более энергоэффективного оборудования и механизмов на новых судах. Это требование подлежит постепенной корректировке каждые 5 лет и направлено на стимулирование непрерывных инноваций и технического развития на этапе проектирования, начиная с базового (2013 г. — нулевой этап). Целью применения меры является примерно 30 %-й рост энергоэффективности в 2025 г. по сравнению с базовым уровнем и дальнейшее совершенствование конструкций уже на третьем этапе. В основном на этапах разработки и внедрения данная мера была посвящена грузовым судам, но в 2014 г. была внесена поправка для учета оценки судов *ро-ро* и пассажирских судов с их соответствующими справочными значениями.

2. Для судов, находящихся в эксплуатации, применяется *эксплуатационный индекс энергоэффективности (ЕЕОІ)*. Такая техническая мера позволяет судовладельцам и операторам измерять эффективность использования топлива судном в процессе эксплуатации и оценивать влияние любых изменений, включая улучшение планирования рейса, техническое обслуживание оборудования и корпуса судна и др.

3. *План управления энергоэффективностью судна (SEEMP)* представляется операционной мерой, которая призвана направлять деятельность судоходных компаний на управление энергоэффективностью судов, используя, например, ЕЕОІ как инструмент мониторинга. Внедрение Плана инициирует продвижение передового опыта эксплуатации судов с учетом рекомендаций по добровольному использованию ЕЕОІ в судоходстве.

Указанные меры в совокупности направлены на внедрение и распространение новых технологий и методов оптимизации характеристик судна. Дальнейшее развитие концепция получила в июне 2021 г. с принятием Комитета по защите морской среды новых поправок к Прил. VI МАРПОЛ для обеспечения дальнейшего роста энергоэффективности судов. Новые дополнительные меры состоят в следующем.

1. Поправкой Комитета по защите морской среды МЕРС 333(76) вводится *индекс энергоэффективности существующих судов (ЕЕХІ)*, выполняющий функцию оценки энергоэффективности всех находящихся в эксплуатации судов, независимо от даты их постройки. Данный параметр аналогичен ЕЕДІ, охватывает те же типы и размеры судов и методом сопоставления с требуемым ЕЕХІ позволяет убедиться в том, что эксплуатируемое судно соответствует требуемому уровню энергоэффективности.

2. *Индикатор интенсивности углерода (СІІ)*, введенный в четырех поправках (от МЕРС 336(76) до МЕРС 339(76)), разъясняющих индексы и способы работы с ними [10]. Рассматриваемая мера устанавливает рейтинг судов от *A* до *E* и определяет ежегодный коэффициент снижения эксплуатационной углеродоемкости судна. Например, любое судно, классифицируемое как *E* или три года подряд как *D*, должно представить план корректирующих действий для достижения рейтинга *C* или выше, обеспечив рост энергоэффективности. При этом в результате ежегодного пересмотра значений СІІ с течением времени действующий рейтинг судна будет понижен (рис. 1).

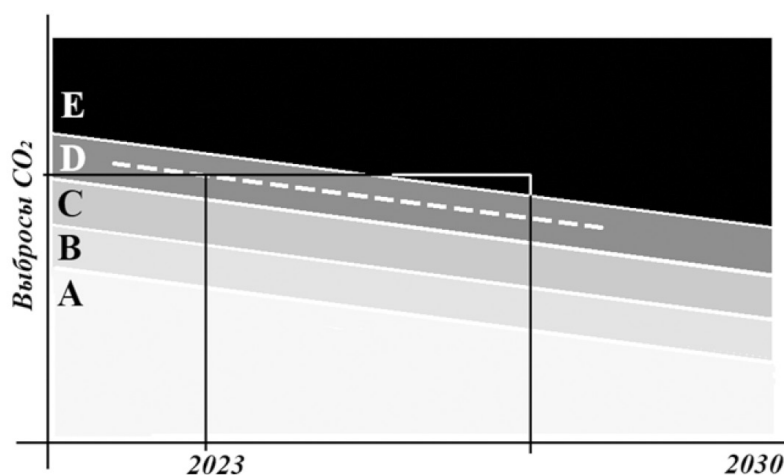


Рис. 1. Индикатор интенсивности выбросов CO₂
Fig. 1. CO₂ emissions intensity indicator

Согласно отчету Международного совета по чистому транспорту [11], [12], наибольшая часть суммарных вредных выбросов от судоходства распределяется следующим образом: 21 % контейнеровозы; 19 % сухогрузы; 13 % танкеры. В этой связи интерес представляют официальные данные ИМО, касающиеся роста энергоэффективности некоторых типов судов, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Тенденции роста энергоэффективности грузовых судов

Тип судна	Повышение энергоэффективности новых судов по сравнению с базовым значением EEDI 2013 г.	Доля новых судов, соответствующих целевым показателям EEDI 2025 г.
Контейнеровозы	На 58 %	71 %
Суда для перевозки генеральных грузов	На 57 %	69 %
Газовозы	На 42 %	13 %
Нефтяные танкеры	На 35 %	26 %
Балкеры	На 27 %	1 %

Помимо регулирования энергоэффективности судов со стороны ИМО, необходимо отметить наборы нормативных актов на европейском уровне. К основным европейским «ориентировкам», затрагивающим вопросы энергоэффективности, следует отнести: мониторинг, отчетность и проверку (MRV), Европейский регламент по утилизации судов (CRR) и Индекс чистого судоходства (CSI). Хронология принятия решений по регулированию на уровне ЕС показана в табл. 3.

Таблица 3

Хронология европейских правил

Организация	Дата	Описание события
MRV	Июнь 2013 г.	Европейская комиссия предлагает Стратегию постепенного включения морских выбросов в политику по парниковым газам.
MRV	Апрель 2015 г.	Стратегия одобрена Европейским парламентом.
MRV	Июль 2015 г.	Стратегия вступает в силу.
MRV	Январь 2018 г.	Судоходные компании должны отслеживать потребление топлива, выбросы углерода и другую соответствующую информацию для каждого судна, находящегося в сфере их ответственности. Первый отчетный период — до декабря 2018 г.
SRR	Ноябрь 2013 г.	SRR предложен Европейским парламентом для скорейшей ратификации Гонконгской конвенции 2009 г. о безопасной и экологически обоснованной утилизации судов.
SRR	Декабрь 2013 г.	SRR вступает в силу.
CSI	14 ноября 2017 г.	Шведская морская администрация утверждает правила фарватерных сборов.
CSI	Январь 2018 г.	Внедряется система, в соответствии с которой суда с высокими экологическими показателями облагаются более низкими сборами.

В табл. 4 приведена хронология создания международных правил и проведения мероприятий за пределами деятельности ИМО, которые имеют отношение к проблемам энергоэффективности судов. Основными из них являются следующие: Гонконгская конвенция (НКС), Принципы Посейдона (PP) и Хартия морских грузов (SCC).

Таблица 4

Хронология международных правил и мероприятий вне рамок деятельности ИМО

Организация	Дата	Описание
НКС	Май 2009 г.	Принята Конвенция о безопасной и экологически чистой утилизации судов.
PP	Ноябрь 2017 г.	Первоначальное совещание финансовых учреждений по климатическим рискам при финансировании судовой отрасли.
PP	Апрель 2018 г.	По соглашению с ИМО установлен уровень требований.
PP	Июнь 2018 г.	Проведены семинары по климатическим рискам в Сингапуре, Лондоне и Нью-Йорке.
PP	Август–сентябрь 2018 г.	Редакционная группа PP начинает работу над первоначальными принципами, которые известны как «Принципы Посейдона».

Таблица 1
(Окончание)

PP	Октябрь 2018 г.	На саммите Глобального морского форума в Гонконге запрошены отзывы промышленных предприятий по первоначальному проекту PP.
PP	Ноябрь 2018 г. – февраль 2019 г.	Редакционная группа PP дорабатывает «Принципы Посейдона», стимулируя банки и другие финансовые учреждения поддерживать «Стратегию ИМО по сокращению выбросов парниковых газов».
PP	18 июня 2019 г.	Презентация «Принципов Посейдона» в Нью-Йорке.
SCC	Июнь 2019 г.	Семинар по климатическим рискам и коллективной цели «Принципов Посейдона» в Лондоне.
SCC	Сентябрь 2018 г. – апрель 2019 г.	Семинары в Сингапуре и Женеве, сбор отзывов от широкой группы заинтересованных сторон о разработке «Хартии морских грузов».
SCC	Октябрь 2019 г.	Стартовое совещание редакционной группы на ежегодном саммите Глобального морского форума в Сингапуре.
SCC	Ноябрь 2019 г. — март 2020 г.	Редакционная группа начинает работу над первоначальными принципами, которые становятся известными как «Устав морских грузов».
SCC	Март 2020 г.	Серия вебинаров для получения отзывов о первоначальном проекте Устава морских грузов от широкой группы заинтересованных сторон.
SCC	Март 2020 г. — июль 2020 г.	Редакционная группа дорабатывает «Хартию морских грузов», обеспечивая структуру, аналогичную «Принципам Посейдона», но применяемую конкретно к фрахтователям.
SCC	7 октября 2020 г.	Запуск морской грузовой хартии во время виртуальной встречи высокого уровня Глобального морского форума.

Таким образом, в мировой судоходной отрасли разработан ряд конкретных правил, направленных на энергоэффективность судов и оказывающих на нее непосредственное влияние. Эти правила, основные из которых были указаны ранее, сведены в табл. 5 в хронологическом порядке.

Таблица 5

Хронология распространения нормативных актов по энергоэффективности

Статус	Дата	Описание
ИМО	Апрель 2009 г.	Первое упоминание о концепциях EEDI и EEOI для сокращения выбросов парниковых газов в МЕРС 59.
ИМО	Июль 2011 г.	EEDI становится необходимым для любых новых судов. (Под «новым» подразумевается любое судно, контракт на которое заключен после января 2013 г., которое вступает в стадию строительства после июля 2013 г. или те, которые приняты в эксплуатацию после июля 2015 г.).
Европейский	Декабрь 2013 г.	Вступает в силу «Закон об утилизации и регулировании судов» (SRR).
Европейский	Январь 2018 г.	Внедряется индекс чистого судоходства, награждающий суда с высокими экологическими показателями меньшими сборами за дальние рейсы.
Европейский	Январь 2018 г.	Судоходные компании, подающие заявку на MRV, должны отслеживать потребление топлива, выбросы углерода и другую соответствующую информацию для каждого судна, находящегося под их юрисдикцией. Первый отчетный период до декабря 2018 г.
ИМО	Январь 2019 г.	Начало первого отчетного периода по всем судам, включенным в Систему сбора данных.
Международный	18 июня 2019 г.	Презентация «Принципов Посейдона» в Нью-Йорке.
Международный	7 октября 2020 г.	Запуск морской грузовой хартии во время виртуальной встречи высокого уровня Глобального морского форума.

Чтобы представить дальнейшую перспективу развития событий по обеспечению энергоэффективности судов, рассмотрению подлежит комплекс мер по оптимизации энергопотребления судна, состоящий из выбора наилучших решений. Проект поправок к Конвенции МАРПОЛ требует сочетания эксплуатационных и технических подходов к энергоэффективности, т. е. большинство мер следует разделить на такие, которые необходимо применять на стадии проектирования и постройки судна, и те, которые могут быть применены к судну на этапе эксплуатации.

Энергоэффективность на этапе проектирования. Очевидным преимуществом этого направления является то, что после внедрения мероприятий, обеспечивающих соответствие требованиям по энергоэффективности, они не требуют постоянного контроля и корректировок для достижения оптимальной производительности, а предписывают только регулярное техническое обслуживание. Такие обстоятельства оставляют судно с оптимизированной энергоэффективностью и «экологическим следом» на протяжении всего жизненного цикла. Предлагаемые методы варьируются от применения альтернативных видов топлива до модификаций корпуса, энергетической установки и систем утилизации энергии отработавших газов [13]. Для оценки указанных мер существует достаточное число методик, но при этом большинство из них используют EEDI в качестве основы [14], [15] и др. Несмотря на имеющиеся недостатки EEDI оказывается полезным в качестве критерия сравнения различных показателей, так как наличие унифицированного набора параметров облегчает оценку энергоэффективности.

Оптимизация формы корпуса судна — метод улучшения характеристик судов для решения различных задач, начиная с повышения гидродинамических характеристик и заканчивая повышением живучести и транспортной эффективности. Общее влияние формы корпуса на энергоэффективность значительно. За истекшее десятилетие EEDI увеличивался за счет таких факторов, как более высокий коэффициент полноты и более низкий коэффициент водоизмещения по длине судна [16]. Анализ влияния длины, ширины и осадки судна на энергоэффективность и топливную экономичность показывает, что уменьшение любого из них на 1 % при неизменном дедейте приводит к снижению потребляемой мощности от 4,6 % для длины, 2 % для ширины и 2,8 % для осадки. При этом влияние размеров корпуса на EEDI является менее значительным, чем на расход топлива, составляя 0,7–2,5 % в зависимости от выбранного параметра.

Процесс оптимизации за счет снижения сопротивления корпуса, основанный на уменьшении смачиваемой поверхности судна, когда внимание сосредоточено на конструктивных изменениях для минимизации лобового сопротивления и использования различных типов бульба и кормы для уменьшения воздействия волн, не в полной мере учитывает факторы влияния на сопротивление движению судна. Значимым аспектом влияния оказывается шероховатость площадь подводной части судна. В этом плане особую важность приобретают не только мероприятия по очистке корпуса, но и разработка и использование специальных покрытий для корпуса, внедрение технологий аэродинамической смазки и др. Установлено, что подводная очистка корпуса танкера «Афромакс» обеспечивает до 9 % снижения расхода топлива, а при постановке судна для очистки корпуса в сухой док достигается до 17 % экономии топлива [17].

Оптимизация судовой энергетической установки может рассматриваться как еще одно направление повышения энергоэффективности, поскольку мощность главных и вспомогательных двигателей напрямую влияет на выбросы CO_2 . Оптимизация возможна на основе новых инновационных технологий силовых установок различных типов. Так, например, паровые системы, особенно системы, реализующие органический цикл Ренкина, выявляют наибольшие потенциальные преимущества, способствуя достижению лучших показателей энергоэффективности для круизных судов, когда требуется глубокая оптимизация электропотребления судна [15]. Другим примером оптимизации являются силовые установки, реализующие принцип электродвижения. При этом наиболее высокую энергоэффективность показывают дизель-электрические установки при модернизации СЭУ [14].

В то время как изучение главного двигателя является очень важным направлением, оптимизация гребных винтов также является ключевым направлением повышения энергоэффективности

[18]. Направленность этого способа роста эффективности инвариантна. Например, несмотря на то, что винты фиксированного шага обычно более экономичны, использование винта регулируемого шага может оказаться более выгодным, если судно в течение длительного времени работает в широком диапазоне рабочих режимов. Таким образом, при оценке силовой установки следует учитывать характеристики всей пропульсивной системы. Подтверждением такого подхода является исследование конструкции, синтеза и эксплуатации пропульсивной системы танкера-газовоза, выполненное в [19], которое демонстрирует потенциальные возможности экономической выгоды до 5,1 % при наилучшем сочетании характеристик двигателя и движителя.

Важным аспектом проблемы роста EEDI также является оптимизация вспомогательных систем судна. Минимизация энергии, потребляемой оборудованием СЭУ за счет использования более эффективных устройств и / или путем снижения потерь в судовой энергосистеме, может оказаться решающим фактором повышения энергоэффективности. Для создания эффективной энергосистемы вспомогательных устройств и механизмов необходим комплексный анализ электроэнергетических потоков в судовой установке, позволяющий выявить основные недостатки и принять необходимые решения для их устранения. Перспективным решением является глубокая рекуперация отработанного тепла, которая по разным данным способна обеспечивать около 72 % потребляемой энергии в ходовом режиме. Существуют также другие эффективные решения, например, работа приводных электродвигателей с изменяющейся частотой вращения в зависимости от требуемой нагрузки [2], задействование валогенераторов [20] и т. д.

Другие возможные подходы к оптимизации энергосистем на судне могут предусматривать стандарты качества электроэнергии, различные частотные диапазоны и влияние топологий силовых преобразователей на каждый из этих частотных диапазонов. Одним из вариантов является использование подачи электроэнергии на суда с берега. В ряде случаев во время выполнения обслуживания судов, грузовых или иных операций в порту энергообеспечение судового оборудования происходит за счет вспомогательных дизель-генераторов, обеспечивающих судно электроэнергией. Использование берегового электропитания позволит вывести из работы вспомогательные двигатели, прекратить расходование топлива и выбросы CO_2 . Такая практика используется судами General Cargo и судами с гибридными системами. Ожидается, что она в ближайшие годы будет внедрена в большинстве портов. Это также очень перспективно для круизных лайнеров из-за большого количества энергии, необходимой пассажирам, которые остаются на борту во время стоянки в порту, что вызывает большое электропотребление судовых бортовых источников тока [21].

Гибридные энергетические системы предусматривают комбинацию первичного теплового двигателя и системы накопления энергии, обычно в виде аккумуляторной батареи. Система производит накопление энергии на низких нагрузках и высвобождает аккумулированную энергию на режимах, близких к предельным, что позволяет первичному двигателю работать с максимальной эффективностью на режиме настройки, обеспечивая тем самым сокращение расхода топлива. Такие системы получили широкое распространение в автомобильной промышленности. Успешное их применение в автопроме вызвало интерес со стороны судостроителей. Согласно результатам первичных исследований, такие установки актуальны для современных балкеров и позволяют достичь повышения общей эффективности судна в размере 2–10 % [22].

Более поздние исследования гибридной энергетической установки танкера с использованием топливных элементов свидетельствуют о потенциальных возможностях сокращения на 9–16 % выбросов CO_2 в зависимости от конфигурации компоновки дизельной установки и топливных элементов [23]. Следует признать, что подобные установки обладают более высокой сложностью и стоимостью, чем обычная архитектура энергетической системы. Существование таких инновационных систем вызвало потребность в создании новой методологии оценки эффективности судов с гибридными энергетическими системами. Эта методология оценивает комплексные энергосистемы, характеризующиеся централизованным производством электроэнергии как для основных, так и для вспомогательных систем, реализуя принципы электродвижения.

Анализ энергоэффективности более 380 современных судов отражает тенденции снижения EEDI ниже эталонного значения для судов с гибридными энергетическими установками [9].

Альтернативные источники энергии, такие как ветряные турбины, фотоэлектрические панели, валогенераторы и другие ресурсы, являются еще одним весьма эффективным и привлекательным способом сокращения выбросов диоксида углерода за счет снижения расхода топлива.

Энергия ветра — один из самых древних источников энергообеспечения судна. В современном флоте это направление отражается в создании конструкций с ветряными турбинами для выработки электроэнергии или в содействии движению судна посредством «жестких парусов» и других устройств (например, роторов Флеттнера — роторные паруса). Использование этих устройств предъявляет специфические требования к конструкции судна, а именно наличие достаточного свободного пространства на палубе без прилегающих конструкций и достаточно прочных мест крепления. Это делает ряд судов непригодными для такого рода устройств (например, контейнеровозы или суда типа Ро-Рах. При этом оборудование танкеров или сухогрузов подобными устройствами обеспечивает экономию до 20 % в зависимости от направления и скорости ветра [24], а срок окупаемости модернизации составляет приблизительно 6 лет.

Несмотря на высокую эффективность использования ветряных устройств наиболее известным альтернативным источником является солнечная энергия, преобразуемая в электроэнергию солнечными батареями. Оборудование преобразователями энергии Солнца силовой установки судна типа Ро-Ро позволяет увеличить на 8 % КПД СЭУ и до 7,4 % снизить потребность в топливе [25]. Дополнительный эффект от применения солнечных батарей состоит в покрытии охлаждаемых зон как в портах, так и на судах, благодаря чему происходит не только производство электроэнергии, но и в ряде случаев снижаются затраты на работу систем охлаждения. Особо эффективным решением помимо солнечной и ветровой энергии, на котором необходимо акцентировать внимание, является использование водородных топливных элементов, которые внедряются в некоторые гибридные системы и обладают КПД, практически и теоретически недостижимым для любых тепловых двигателей, поскольку не подпадают под действие теоремы Карно [26]. Водород становится все более распространенным способом хранения энергии и может быть получен с использованием абсолютно экологически безопасных источников, не провоцирующих выбросов диоксида углерода. Добавление топливного элемента мощностью 3 МВт с 770 м³ сжатого водорода может производить 10,6 ГВт·ч энергии в год, сокращая при этом выбросы CO₂ более чем на 2300 т [8].

Создание установок на нетрадиционных топливах может рассматриваться как одно из наиболее перспективных направлений сокращения выбросов парниковых газов на стадии проектирования судов. Уникальность данного направления состоит в том, что оно способно обеспечить 100 %-е сокращение выбросов CO₂ путем использования топлив, не содержащих в своем составе углерода. Наибольшие ожидания в сокращении выбросов диоксида углерода связаны с разработкой конструкций СЭУ, адаптированных к использованию новых видов топлив, не нарушающих естественный оборот CO₂ в природе, взамен традиционных ископаемых углеводородов. К таким топливам, как отмечалось в [27], следует отнести аммиак, метанол, биогаз и др.

Энергоэффективность на этапе эксплуатации. В то время как все описанные ранее методы могут способствовать значительной экономии энергии и позволяют добиться существенного сокращения выбросов CO₂ и затрат на топливо, их главный недостаток состоит в том, что они могут применяться только на стадиях постройки и проектирования судов, а суда, находящиеся в эксплуатации для реализации этих новаторских концепций, могут потребовать глубокой модернизации, что повлечет за собой высокие инвестиционные затраты. Однако и на этапе эксплуатации суда способны сокращать свои выбросы посредством относительно простых средств, таких, например, как замена используемого топлива и оптимизация рейса, даже несмотря на то, что подобные меры могут иметь предел как по безопасности, так и экономической целесообразности. Эксплуатационные меры могут применяться к любому судну и не требуют глубокой модернизации энергетической установки или изменения ее конструкции. Необходимо отметить, что меры, касающиеся этого направления, имеют большую историю и даже предшествуют разработке и введению EEDI.

Одним из наиболее распространенных и доступных способов минимизации энергопотребления является сокращение скорости перевозок. Так, снижение скорости движения контейнеровоза всего на 5 % вызывает снижение расхода топлива в пределах 16–19 %. Более скромные результаты в пределах 13 % экономии достигаются для сухогрузов и танкеров. Дополнительная экономия топлива может быть достигнута путем снижения энергопотребления вспомогательным оборудованием. Учитывая, что до 70 % от потребления приходится на насосы (большой потенциал имеет использование насосов регулируемой производительности). Примером может служить оборудование, которое позволяет снизить на 60 % потребление электроэнергии циркуляционных насосов системы охлаждения главного двигателя [28]. В полной мере такая экономия может быть распространена и на оборудование других систем (топливной, масляной, вентиляции и т. д.).

Практика «медленного движения» представляется весьма ценной и актуальной, но у нее имеются недостатки, состоящие в том, что для судна по мере снижения проектной скорости ухудшается управляемость и оно теряет устойчивость на курсе и кроме того, увеличивается продолжительность рейса. Это повышает важность выбора оптимального маршрута для операторов судов как фактора снижения выбросов парниковых газов и роста энергоэффективности.

Известно, что одним из ключевых аспектов влияния на эксплуатационную энергоэффективность является влияние факторов окружающей среды, таких как скорость и направление ветра, скорость течений и глубина под килем. При этом данные многочисленных исследований указывают на то, что высота волны и скорость ветра являются основными неблагоприятными факторами для достижения высокой энергоэффективности. Изменчивость во времени и неопределенность, связанные с этими факторами, могут затруднить определение оптимальной скорости плавания даже при наличии эмпирических данных о состоянии моря. В настоящее время все большее внимание уделяется разработке методов динамической оптимизации условий перевозок, внедрение которых, по данным [3], могут обеспечить снижение до 28 % расхода топлива.

При рассмотрении вопросов повышения эксплуатационной энергоэффективности необходимо уделить отдельное внимание оптимизации загрузки судна. В этой связи на первый план выходит не только наиболее полное и эффективное использование грузового пространства, но и способы сокращения сопротивления движению судна за счет выбора наиболее выгодного деферента с учетом условий средней осадки. Этот метод эффективен в сочетании с отмеченными ранее и зависит от таких факторов, как скорость и направление ветра, осадка судна и мощность главного двигателя. В исследованных случаях максимальное снижение расхода топлива может достигать почти 14 %. Это означает, что существующие суда могут получить огромный выигрыш в энергоэффективности при минимальных затратах [7]. Это особенно актуально, если оптимальная дифференровка может быть достигнута за счет смещения грузов без использования водяного балласта.

Как следует из ранее изложенного, энергоэффективность судов коммерческого флота, структура которой представлена на рис. 2, является совокупностью разнонаправленных подходов, охватывающих весь жизненный цикл судна от проектирования до утилизации с учетом его назначения. Как следствие, построение всеобъемлющего критерия оценки энергоэффективности остается востребованной, но не решенной в полной мере задачей.

Несмотря на существование всех существующих экономически эффективных технических мер судоходные компании в ряде случаев принимают их без особого энтузиазма и крайне настоятельно. Такой подход со стороны компаний называют «разрывом в энергоэффективности» [29]. Он в ряде случаев может состоять в конфликте интересов, когда на рынке фрахтования выгодоприобретатель не является инвестором проекта и тогда инвестор может не извлечь выгоды из проекта. По этой причине чаще всего среди оперативных мер применяется практика «медленного движения» [30]. Кроме того, существуют и другие препятствия на пути развития энергоэффективности судоходства.



Рис. 2. Классификация методов повышения энергоэффективности
Fig. 2. Classification of methods for increasing energy efficiency

Внедрение методов энергоэффективности требует новых политических решений, организационных мероприятий и новой инфраструктуры для обеспечения мониторинга инвариантных подходов к разрешению рассматриваемых проблем. В этом плане новаторские проекты могут оказать помощь как компаниям, так и разработчикам новых требований при наличии взаимных интересов. Примером могут служить политические решения со стороны ИМО, касающиеся достижения энергоэффективности, среди которых в первую очередь необходимо выделить «План управления энергоэффективностью судов» — SEEMP. Таким образом, достижение высокой энергоэффективности коммерческого флота требует дальнейших исследований и разработок оценочных методик, направленных на понимание того, как знания и накопленный опыт по вопросам энергетики могут быть использованы среди судоходных компаний, а также на использование и дальнейшее развитие систем мониторинга применяемых мер в области энергоэффективности.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Нормы и принципы регулирования энергоэффективности в судоходной отрасли находятся в постоянной динамике и внедряются как на региональном, так и на международном уровне. Важные и действенные шаги по регламентации предпринимаются со стороны Международной морской организации, разработавшей и совершенствующей инструменты регулирования: конструктивный и эксплуатационный Индекс энергоэффективности, План управления энергоэффективностью, Индекс энергоэффективности существующих судов, Индикатор интенсивности углерода. К наиболее значимым инструментам регулирования в судоходной отрасли на международном уровне следует отнести Принципы Посейдона, Хартию морских грузов и др. На европейском уровне вопросы энергоэффективности решаются такими средствами, как Индекс чистого судоходства, Европейский регламент по утилизации судов, мониторинг, отчетность и проверка.

2. Разработанные ИМО критерии оценки энергоэффективности в виде коэффициентов энергоэффективности оказываются крайне полезными для регулирования. Тем не менее методики их оценки не представляются совершенными и универсальными, поэтому требуют постоянного пересмотра и доработки с учетом постоянного развития и совершенствования технологий.

3. Энергоэффективность судов должна обеспечиваться и поддерживаться в течение всего жизненного цикла судна как на стадии проектирования и постройки, так и в процессе эксплуатации судна, вплоть до утилизации. При этом благодаря применяемым мерам экономия топлива может варьироваться от 25 до 75 %.

4. Среди конструктивных мер обеспечения требуемого уровня энергоэффективности на стадии проектирования выделяется ряд направлений, наиболее актуальными среди которых являются оптимизация корпуса судна, оптимизация энергетической установки, использование альтернативных источников энергии, создание конструкций установок, способных работать на альтернативных видах топлив, включая углеродно-нейтральные и безуглеродные, внедрение конструкций гибридной энергетической установки. Так, при наилучшем сочетании характеристик двигателя и движителя можно ожидать более 5 % экономической выгоды. Использование гибридных установок позволит достичь до 10 % повышения общей эффективности судна, а использование альтернативных источников энергии — до 20 %.

5. Применяемые меры по повышению энергоэффективности на стадии проектирования и постройки, несомненно, оказывают существенное и длительное влияние на снижение выбросов CO₂. При этом не следует игнорировать действенные методы, которые могут применяться на этапе эксплуатации. Среди таких методов, которые не требуют глубокой модернизации энергетической установки — обоснованное сокращение скорости перевозки, назначение рациональных режимов работы оборудования СЭУ, оптимизация маршрутов движения и загрузки судна. Указанные методы применимы к любым судам, находящимся в эксплуатации. Например, снижение скорости перевозок на 5 % способно обеспечить до 19 % сокращения расхода топлива, динамическая оптимизация условий перевозок может привести к снижению расхода топлива на 20 %, а оптимизация загрузки судна в ряде случаев обеспечивает до 14 % экономии топлива.

6. На пути к экологически чистому судоходству существуют сложности, препятствующие совершенствованию и применению даже самых рентабельных новаций. Поэтому необходимо предпринимать постоянные усилия в разработке адекватных решений по устранению возникающих проблем, в том числе политических, что способствует минимизации разрыва в энергоэффективности, а также преодолению трудностей в создании конкурентоспособного и экологически устойчивого судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
2. Hüffmeier J. State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships / J. Hüffmeier, M. Johanson // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. — Is. 4. — Pp. 447. DOI: 10.3390/jmse9040447.
3. Wang K. Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors / K. Wang, X. Yan, Y. Yuan, X. Jiang, X. Lin, R. R. Negenborn // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2018. — Vol. 62. — Pp. 685–698. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.005.
4. Beşikçi E. B. An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures / E. B. Beşikçi, T. Keceli, O. Arslan, O. Turan // Ocean engineering. — 2016. — Vol. 121. — Pp. 392–402. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.031.
5. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
6. Ang J. H. Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment / J. H. Ang, C. Goh, A. A. F. Saldivar, Y. Li // Energies. — 2017. — Vol. 10. — Is. 5. — Pp. 610. DOI: 10.3390/en10050610.

7. *Moustafa M. M.* Energy efficient operation of bulk carriers by trim optimization / M. M. Moustafa, W. Yehia, A. W. Hussein // 18th International Conference on Ships and Shipping Research. — Italy: Organising Committee NAV, 2015. — Pp. 484–493.
8. *McKinlay C. J.* Fuel cells for shipping: To meet on-board auxiliary demand and reduce emissions / C. J. McKinlay, S. R. Turnock, D. A. Hudson // Energy Reports. — 2021. — Vol. 7. — Suppl. 2. — Pp. 63–70. DOI: 10.1016/j.egy.2021.02.054.
9. *Ančić I.* Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems / I. Ančić, N. Vladimir, L. R. Luttenberger // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 166. — Pp. 350–357. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.042.
10. *Шурпьяк В. К.* Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу / В. К. Шурпьяк, С. А. Толмачев, М. В. Мусонов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64–65. — С. 4–18.
11. *Amorariței M.* A preliminary propulsive performances evaluation for an oil tanker to meet EEDI challenge / M. Amorariței // Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding. — 2019. — Vol. 42. — Pp. 103–108.
12. *Constantin G.* Analysis of the energy efficiency design index for two container ships and EEDI influence on propulsion performances / G. Constantin, M. Amorariței // Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding. — 2018. — Vol. 41. — Pp. 127–132.
13. *Tokuşlu A.* Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) performance of a container ship / A. Tokuşlu // International Journal of Environment and Geoinformatics. — 2020. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 114–119. DOI: 10.30897/ijegeo.703255.
14. *Ammar N. R.* Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel / N. R. Ammar, I. S. Seddiek // Environmental Science and Pollution Research. — 2021. — Vol. 28. — Pp. 37851–37866. DOI: 10.1007/s11356-021-13271-4.
15. *El Geneidy R.* Increasing energy efficiency in passenger ships by novel energy conservation measures / R. El Geneidy, K. Otto, P. Ahtila, P. Kujala, K. Sillanpää, T. Mäki-Jouppila // Journal of Marine Engineering & Technology. — 2018. — Vol. 17. — Is. 2. — Pp. 85–98. DOI: 10.1080/20464177.2017.1317430.
16. *Papanikolaou A.* Holistic ship design optimization / A. Papanikolaou // Computer-Aided Design. — 2010. — Vol. 42. — Is. 11. — Pp. 1028–1044. DOI: 10.1016/j.cad.2009.07.002.
17. *Adland R.* The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning / R. Adland, P. Cariou, H. Jia, F. C. Wolff // Journal of Cleaner Production. — 2018. — Vol. 178. — Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.247.
18. *Марговский В. В.* Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2: Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов / В. В. Марговский, В. Н. Половинкин, А. В. Пустошный, О. В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № 1 (403). — С. 167–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182.
19. *Marques C. H.* An early-stage approach to optimise a marine energy system for liquefied natural gas carriers: Part B — Application / C. H. Marques, C. R. P. Belchior, J. D. Caprace // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 174. — Pp. 96–107. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.045.
20. *Медведев В. В.* Оценка возможности уменьшения конструктивного коэффициента энергетической эффективности за счет применения валогенераторов в составе судовых энергетических установок с главными высокооборотными двигателями / В. В. Медведев, В. В. Гаврилов, И. А. Сорокин // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1–3 (47). — С. 101–106. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.048.
21. *Iris Ç.* A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems / Ç. Iris, J. S. L. Lam // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2019. — Vol. 112. — Pp. 170–182. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.069.
22. *Dedes E. K.* Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy policy. — 2012. — Vol. 40. — Pp. 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.
23. *Giap V. T.* System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine / V. T. Giap, Y. D. Lee, Y. S. Kim, K. Y. Ahn, D. H. Kim, J. I. Lee // Energy conversion and management. — 2020. — Vol. 223. — Pp. 113265. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113265.
24. *Seddiek I. S.* Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers / I. S. Seddiek, N. R. Ammar // Environmental Science and Pollution Research. — 2021. — Vol. 28. — Pp. 32695–32707. DOI: 10.1007/s11356-021-12791-3.

25. Karatuğ Ç. Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study / Ç. Karatuğ, Y. Durmuşoğlu // *Solar Energy*. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 1259–1268. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.037.

26. Живлюк Г. Е. Применение топливных элементов в энергообеспечении водного транспорта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

27. Живлюк Г. Е. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.

28. Dere C. Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency / C. Dere, C. Deniz // *Journal of Cleaner Production*. — 2019. — Vol. 222. — Pp. 206–217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.030.

29. Johnson H. Barriers to energy efficiency in shipping / H. Johnson, K. Andersson // *WMU Journal of Maritime Affairs*. — 2016. — Vol. 15. — Pp. 79–96. DOI: 10.1007/s13437-014-0071-z.

30. Rehmatulla N. Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem / N. Rehmatulla, T. Smith // *Energy Policy*. — 2015. — Vol. 84. — Pp. 44–57. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.04.019.

REFERENCES

1. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.

2. Hüffmeier, Johannes, and Mathias Johanson. “State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships.” *Journal of Marine Science and Engineering* 9.4 (2021): 447. DOI: 10.3390/jmse9040447.

3. Wang, Kai, Xinping Yan, Yupeng Yuan, Xiaoli Jiang, Xiao Lin, and Rudy R. Negenborn. “Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 62 (2018): 685–698. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.005.

4. Beşikçi, E. Bal, T. Kecici, O. Arslan, and O. Turan. “An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures.” *Ocean engineering* 121 (2016): 392–402. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.031.

5. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

6. Ang, Joo Hock, Cindy Goh, Alfredo Alan Flores Saldivar, and Yun Li. “Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment.” *Energies* 10.5 (2017): 610. DOI: 10.3390/en10050610.

7. Moustafa, M. M., W. Yehia, and A. W. Hussein. “Energy efficient operation of bulk carriers by trim optimization.” *18th International Conference on Ships and Shipping Research*. Italy: Organising Committee NAV, 2015. 484–493.

8. McKinlay, C. J., S. R. Turnock, and D. A. Hudson. “Fuel cells for shipping: To meet on-board auxiliary demand and reduce emissions.” *Energy Reports* 7 (2021): 63–70. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.02.054

9. Ančić, Ivica, Nikola Vladimir, and Lidija Runko Luttenberger. “Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems.” *Ocean Engineering* 166 (2018): 350–357. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.042.

10. Shurpyak, V. K., S. A. Tolmachev, and M. V. Musonov. “New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 64–65 (2021): 4–18.

11. Amaraitei, Mihaela. “A preliminary propulsive performances evaluation for an oil tanker to meet EEDI challenge.” *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding* 42 (2019): 103–108.

12. Constantin, Gabriel, and Mihaela Amaraitei. “Analysis of the energy efficiency design index for two container ships and EEDI influence on propulsion performances.” *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding* 41 (2018): 127–132.

13. Tokuşlu, Aydın. “Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) performance of a container ship.” *International Journal of Environment and Geoinformatics* 7.2 (2020): 114–119. DOI: 10.30897/ijegeo.703255.
14. Ammar, Nader R., and Ibrahim S. Seddiek. “Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel.” *Environmental Science and Pollution Research* 28 (2021): 37851–37866. DOI: 10.1007/s11356-021-13271-4.
15. El Geneidy, Rami, Kevin Otto, Pekka Ahtila, Pentti Kujala, Kari Sillanpää, and Tero Mäki-Jouppila. “Increasing energy efficiency in passenger ships by novel energy conservation measures.” *Journal of Marine Engineering & Technology* 17.2 (2018): 85–98. DOI: 10.1080/20464177.2017.1317430.
16. Papanikolaou, Apostolos. “Holistic ship design optimization.” *Computer-Aided Design* 42.11 (2010): 1028–1044. DOI: 10.1016/j.cad.2009.07.002.
17. Adland, Roar, Pierre Cariou, Haiying Jia, and Francois-Charles Wolff. “The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning.” *Journal of Cleaner Production* 178 (2018): 1–13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.247.
18. Magarovskiy, V. V., V. N. Polovinkin, A. V. Pustoshny, and O. V. Savchenko. “Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry Part 2. Efficiency analysis of power-saving measures intended to reduce greenhouse gas emissions.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(403) (2023): 167–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182.
19. Marques, Cristófer Hood, Carlos Rodrigues Pereira Belchior, and Jean-David Caprace. “An early-stage approach to optimise a marine energy system for liquefied natural gas carriers: Part B — Application.” *Ocean Engineering* 174 (2019): 96–107. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.045.
20. Medvedev, V. V., V. V. Gavrilov, and I. A. Sorokin. “Evaluation of the possibility of reducing the energy efficiency design index based on the application of shaft generators in the composition of marine power plant with main high-speed engine.” *Marine Intellectual Technologies* 1–3(47) (2020): 101–106. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.048.
21. Iris, Çağatay, and Jasmine Siu Lee Lam. “A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112 (2019): 170–182. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.069.
22. Dedes, Eleftherios K., Dominic A. Hudson, and Stephen R. Turnock. “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping.” *Energy policy* 40 (2012): 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.
23. Giap, Van-Tien, Young Duk Lee, Young Sang Kim, Kook Young Ahn, Dae Hee Kim, and Jung Il Lee. “System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine.” *Energy conversion and management* 223 (2020): 113265. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113265.
24. Seddiek, Ibrahim S., and Nader R. Ammar. “Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers.” *Environmental Science and Pollution Research* 28 (2021): 32695–32707. DOI: 10.1007/s11356-021-12791-3.
25. Karatug, Çağlar, and Yalçın Durmuşoğlu. “Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study.” *Solar Energy* 207 (2020): 1259–1268. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.037.
26. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “The use of fuel cells in the energy supply of water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.
27. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
28. Dere, Caglar, and Cengiz Deniz. “Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency.” *Journal of Cleaner Production* 222 (2019): 206–217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.030.
29. Johnson, Hannes, and Karin Andersson. “Barriers to energy efficiency in shipping.” *WMU Journal of Maritime Affairs* 15 (2016): 79–96. DOI: 10.1007/s13437-014-0071-z.
30. Rehmatulla, Nishatabbas, and Tristan Smith. “Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem.” *Energy Policy* 84 (2015): 44–57. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.04.019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: *spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru*

Петров Александр Павлович —

кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: *app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: *spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru*

Petrov, Aleksandr P. —

PhD, professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: *app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 11 января 2024 г.

Received: January 11, 2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-318-327

ALGORITHM FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF A DISCRETE-DYNAMIC CONSUMPTION FUNCTION USING A NEURAL NETWORK BY MATLAB

A. A. Chertkov, Ya. N. Kask, V. E. Terentiev

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

The purpose of the work is to ensure continuous monitoring of the characteristics and operational indicators of urban facilities and its transport infrastructure by assessing the parameters that affect not only the level of organization and automation of the processes of documenting current statistical information on consumer expenditures of the population, but also the state of production of necessary consumer goods and transport services as a whole. An algorithm for numerical estimation of the parameters of regression models of consumption functions built on the basis of statistics of socio-economic development of the region is proposed. Its significant difference from the known methods of estimation is the use of neural network technologies, which contribute to a significant expansion of the technical capabilities of modeling and increase the accuracy of calculations by obtaining recurrent estimates of the vector of the desired model coefficients. It is shown that for the considered class of problems of “fitting” the trajectories of the consumption function to statistical data, it is possible to apply neural models of generalized regression networks with simple training modes and high modeling accuracy. The use of neural network technologies provides the maximum approximation of the production function model of a given structure to the neural model to a given initial approximation with its subsequent use for estimating weight coefficients. The method application is demonstrated by estimating the parameters of the discrete-dynamic model of the consumption function according to the corresponding statistical series. Calculations are performed using the functions of the Neural Networks Toolbox of the MATLAB environment. The method is applicable for quantitative estimates of the parameters of production models with complex logical-probabilistic relationships, as well as for obtaining numerical values of target indicators and indicators for assessing the development of inland water transport by statistical series and monitoring.

Keywords: algorithm, Cobb-Douglas model, neural network, parameter estimation, regression, statistical series, technologies, consumption function.

For citation:

Chertkov, Alexandr A., Yaroslav N. Kask, and Vladislav E. Terentiev. “Algorithm for estimating the parameters of a discrete-dynamic consumption function using a neural network by MATLAB.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 318–327. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-318-327.

УДК. 621.398.04

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ СРЕДСТВАМИ MATLAB

А. А. Чертков, Я. Н. Каск, В. Е. Терентьев

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

Целью работы является обеспечение непрерывного мониторинга, прогнозирования и достоверности показателей состояния производства и факторов его роста на предприятиях водного транспорта, по данным статистики, на основе опыта моделирования и параметрической оценки производственных функций с применением нейронных сетей и интеллектуальных систем. В связи с этим появляется возможность формирования значений целевых индикаторов и показателей развития внутреннего водного транспорта по контрольным периодам на краткосрочном и стратегическом уровнях. Предлагается алгоритм численной оценки параметров моделей производственных функций потребления, построенных с помощью регрессионных нейросетей по данным статистики социально-экономического развития региона. Отмечается, что существенным отличием данного способа оценки является использование нейросетевых технологий, способствующих значительному расширению технических возможностей моделирования и повышению точности вычислений путем получения рекуррентных оценок вектора искомых коэффициентов модели. Показано, что для рассматриваемого класса задач «пригонки» траекторий функции потребления к статистическим данным можно применять нейронные модели обобщенно-регрессионных сетей, обладающие простыми режимами обучения и высокой точностью моделирования. При этом применение нейросетевых технологий обеспечивает максимальное приближение модели производственной функции заданной структуры к нейронной модели при заданном начальном приближении с последующим ее использованием для оценки весовых коэффициентов. Применение алгоритма продемонстрировано на примере оценок параметров аппроксимированной с помощью нейросети функции потребления по соответствующим данным временных рядов. Получены численные оценки с применением операторных функций из арсенала *Neural Networks Toolbox* среды *MATLAB*. Предложенный алгоритм может быть применен для численного анализа производственных моделей потребления со сложными логико-вероятностными связями при оценивании целевых индикаторов и показателей развития внутреннего водного транспорта.

Ключевые слова: алгоритм, модель Кобба – Дугласа, нейронная сеть, оценка параметров, регрессия, статистический ряд, технологии, функция потребления.

Для цитирования:

Чертков А. А. Алгоритм оценки параметров дискретно-динамической модели функции потребления при помощи нейронной сети средствами *MATLAB* / А. А. Чертков, Я. Н. Каск, В. Е. Терентьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 318–327. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-318-327.

Введение (Introduction)

При моделировании различных экономико-производственных процессов предполагается, что структуры их математических моделей могут быть заранее известны. При этом задача идентификации известной модели с неизвестными параметрами требует численной оценки ее параметров путем решения обратной задачи с применением различных параметрических методов на основе данных мониторинга и статистики. Такие задачи хорошо известны и играют важную роль для численных оценок обобщенных показателей моделей социально-экономического развития отдельных предприятий и территорий промышленного производства. В частности, задача оценивания параметров широко применяется в макроэкономических моделях при мониторинге и уточнении статистических показателей эффективности социально-экономического развития крупных региональных центров. Наиболее известным исследователем макроэкономики по праву считается Дж. М. Кейнс [1]–[3], который значительно расширил горизонт представлений о характере функционирования рыночной экономики, разработав оригинальный подход, учитывающий объем и динамику национального дохода, уровень цен, темпы инфляции и экономического роста. Наиболее известные макроэкономические модели российской экономики, предложенные российскими учеными К. Б. Михайленко (2004 г.), М. Н. Бродским (2006 г.), С. А. Айвазяном и др. (2013 г.), Д. В. Скрыпником (2016 г.), основаны на модели коррекции ошибок с наличием средне- и долгосрочных соинтеграционных соотношений [4].

Из [1] известно, что ключевым элементом любой макроэкономической модели является достижение равновесного соотношения между спросом и предложением, т. е. макроэкономического баланса, согласно которому агрегированный доход (выпуск товаров) определяется как сумма потребительских и государственных расходов, экспорта и инвестиций. Данные статистики в текущих и постоянных ценах регулярно публикуются Росстатом и региональными статистическими

ведомствами. Решение задачи обеспечения макроэкономического баланса в постоянных ценах предполагает выделение той части приращения номинального валового внутреннего продукта (ВВП) и его составляющих, которая объясняется наращиванием реальных объемов производства и потребления, а не изменением цен. Обеспечение текущего или номинального макроэкономического равновесия (в текущих ценах) требует учета изменения цен, показателем которого служит дефлятор, или индекс цен ВВП [5]. Причем «номинальные» доли расхода ВВП по составляющим дают ответы на вопросы, какие их части агрегированного дохода идут на потребление, а какие на покупку инвестиционных товаров в рублях.

Главным направлением, определяющим конкурентоспособность продукции в сфере хозяйственной деятельности и потребления, является *цифровизация процессов управления и численного анализа эффективности принятия решений*, предполагающая широкое использование компьютерных систем искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей и технологий [6], [7]. Так, например, в качестве практического приложения нейронных сетей может служить параметрическая идентификация производственных функций, одной из которых является функция потребления по множеству данных статистических временных рядов. Эта процедура требует построения нейронной модели, являющейся, по сути, функцией интерполяции данных статистических рядов для последующей ее аппроксимации («пригонки», приближения) к модели с заданной структурой при условии обеспечения минимума среднеквадратичной ошибки.

Наиболее известной в макроэкономике моделью производственной функции является модель Кобба – Дугласа [8]–[10], учитывающая зависимость объема выпуска продукции (дохода) от основных факторов его производства: затрат труда и капитала. Наряду с моделями Кобба – Дугласа для оценивания хозяйственной деятельности предприятия рассматривается класс производственных моделей, содержащих экзогенные (внешние) и эндогенные (внутренние) переменные: CES — модели функций потребления, а также модели Клейна и Голдберга (США), учитывающие связь потребительского и инвестиционного спроса с текущим доходом [11], [12]. Таким образом, решение задачи идентификации параметров производственной функции потребления с применением нейронных сетей позволит автоматизировать процессы анализа, прогнозирования динамики производства товаров и их потребления в рамках региональных организационно-технологических структур и предприятий водного транспорта, а также управлять планированием их социально-экономического развития.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В предлагаемой работе рассматривается задача параметрического оценивания модели с заданной структурой, являющейся совокупностью уравнений классического вида, включающей два балансовых и одно стохастическое уравнения. Связь потребления с перманентным валовым продуктом в постоянных ценах потребления домохозяйств [4], [5]:

$$C_t = \beta y_t^P, \quad (1)$$

где y_t^P — перманентный доход (постоянная часть располагаемого дохода);

β — параметр, соответствующий средней склонности к потреблению перманентного ВВП в постоянных ценах потребления населения.

Динамика процесса потребления описывается процессом адаптивных ожиданий, в котором приращение перманентного дохода в постоянных ценах потребления домохозяйств пропорционально разности фактического и перманентного дохода предыдущего периода:

$$y_t^P - y_{t-1}^P = \lambda(y_t - y_{t-1}^P), \quad (2)$$

где λ — весовой коэффициент.

Таким образом, уровень перманентного дохода является средневзвешенной величиной от текущего дохода в настоящий момент времени и перманентного дохода в предыдущий момент времени:

$$y_t^P = \lambda y_t + (1 - \lambda) y_{t-1}^P. \quad (3)$$

В модели (2) показатель перманентного дохода в постоянных ценах потребления населением все еще является ненаблюдаемой величиной. Выразим его через наблюдаемые переменные с помощью преобразования Койка. Подставив перманентный доход из уравнения (1) в уравнение (3) и произведя в нем ряд алгебраических упрощений, получим уравнение динамики для потребления домохозяйств:

$$C_t = \beta \lambda y_t + (1 - \lambda) C_{t-1}, \quad (4)$$

где $\beta \lambda$ — величина, характеризующая предельную склонность к потреблению текущего (фактического) дохода в постоянных ценах потребления.

Для более точной интерпретации уровня потребления в уравнение (4) введен случайный член возмущения ε :

$$C_t = \beta \lambda y_t + (1 - \lambda) C_{t-1} + \varepsilon, \quad (5)$$

позволяющий учесть влияние на потребление других неучтенных факторов.

Для приведения предлагаемой модели к компактному виду, удобному для моделирования, далее предложен ряд упрощений, позволяющих оценить ее параметры с помощью нейросети из приложения MATLAB, используя при этом в полной мере весь объем информации, содержащейся в данных статистических рядов.

На первом этапе параметрической идентификации, сохранив структуру модели функции потребления (5), учтем производственные и технологические показатели из данных статистики. С этой целью построим по заданным временным рядам ее адекватную дискретную динамическую модель, в которую вводится дефлятор P_C потребительских расходов (индекс потребительских цен), учитывающий инфляцию. С целью упрощения динамической модели (5) и приведения ее к виду, адекватному реальному процессу, введем в нее обобщенные коэффициенты:

$$a_0 = \varepsilon; a_1 = \beta \lambda P_C; a_2 = 1 - \lambda.$$

Тогда математическая модель функции потребления, в которой $y_t = Y_D$, примет следующий вид:

$$C = a_0 + a_1(Y_D / P_C) + a_2 C(-1), \quad (6)$$

где a_0, a_1, a_2 — постоянные коэффициенты соответствующей размерности;

C — реальные потребительские расходы на i -м шаге;

P_C — дефлятор потребительских расходов;

Y_D — доходы;

C_{i-1} — потребительские расходы на предыдущем шаге.

На втором этапе построим и обучим нейронную модель функции потребления по данным региональной статистики за период с I квартала 2003 г. по IV квартал 2013 г. с применением нейросетевых технологий. Отметим, что вектор $C(-1)$, отражающий эффект поддержания расходов на уровне потребления на предшествующем шаге с помощью автокорреляционной функции первого порядка $C_t = f(C_{t-1})$ образован по статистике C размерности $(1 \times n)$. В связи с этим размерность векторов C и $C(-1)$, входящих в модель (6), уменьшена на единицу.

Приведем фрагмент файла, реализующего способ оценки:

```
%Файл «fponet3.m»
% Поблочная загрузка временных рядов из файла командой (load file):
% Группирование данных для обобщенного вектора параметров модели:
x1=ones(43,1); x21=YD'./PC'; x2=x21(2:44,1); x31=C'; x3=x31(1:43,1);
Y1=C'; Y=Y1(2:44,1);
X=[x1 x2 x3];
```

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*:

% Построение и обучение нейронной сети

```
K=X(:,2); L=X(:,3); P=[K L]'; T=Y';
```

```
spread=1.0;
```

```
net=newgrnn(P,T,spread)
```

% Построение нейронной модели функции потребления

```
Cm=sim(net,P);
```

В результате обучения нейросети получим следующие ее параметры:

```
net =
```

```
Neural Network
```

```
name: 'Generalized Regression Neural Network'
```

```
userdata: (your custom info)
```

```
dimensions:
```

```
numInputs: 1
```

```
numLayers: 2
```

```
numOutputs: 1
```

```
numInputDelays: 0
```

```
numLayerDelays: 0
```

```
numFeedbackDelays: 0
```

```
numWeightElements: 172
```

```
sampleTime: 1
```

```
connections:
```

```
biasConnect: [1; 0]
```

```
inputConnect: [1; 0]
```

```
layerConnect: [0 0; 1 0]
```

```
outputConnect: [0 1]
```

На третьем этапе выполним оценивание параметров функции потребления в системе MATLAB путем «пригонки» ее по модели, сформированной в процессе обучения нейросети. С этой целью применим операторную функцию $C_m = \text{sim}(\text{net}, P)$, в которой P определяется исходным временным рядом. Полученные после обучения нейронной сети численные значения вектора C_m являются оценками значений искомой функции C .

Графики эксперимента (статистического ряда) C_i и нейронной модели C_m представлены на рис. 1, откуда видно, что непрерывная кривая нейронной модели C_m точно проходит через систему узловых точек «о», т. е. выполнена 100%-я интерполяция статистического ряда C_i , что свидетельствует о высоком качестве моделирования используемой обобщенной нейросети. Обученная модель нейронной сети, как видно из результатов обучения, содержит 172 весовых элементов (numWeightElements: 172).

Искомые коэффициенты модели (6) получим с помощью функции lsqcurvefit, обеспечивающей наилучшим образом приближение выхода модели к выходу C_m , рассчитанному с помощью нейронной сети по формуле (3).

Алгоритм оптимальной идентификации предусматривает выполнение следующих действий:

1. Строится файл-функция F для модели (6), в которой коэффициенты представлены вектором переменных состояния, отражающим заданную структуру модели.

2. Выполняются условия синтаксиса функции «пригонки» lsqcurvefit из инструментария MATLAB, аргументами которой являются файл-функция, начальное приближение, время, выход нейронной модели, нижняя и верхняя границы.

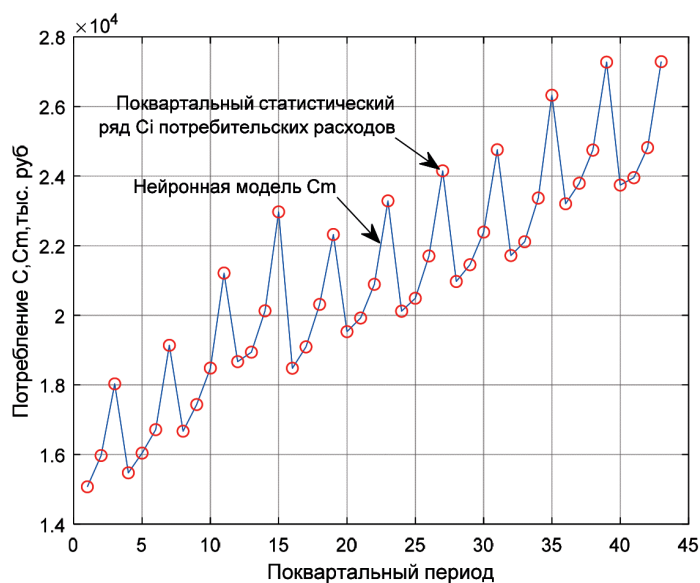


Рис. 1. Моделирование функции потребления при помощи нейронной сети
Fig. 1. Modeling the consumption function using a neural network

3. С помощью функции «пригонки» по данным вектора C_m реализуем наилучшие оценки коэффициентов модели вектора x , позволяющие построить модель функции потребления, отвечающую заданной структуре:

$$y = x(1) + Kx(2) + Lx(3),$$

где $K = (Y_D/P_C)$, $L = C(-1)$.

4. Операция «пригонки» реализует наилучшие оценки вектора x по методу наименьших квадратов:

$$\min_x \|F(x, P) - C_m\|^2.$$

5. По известной модели $F(x, P)$ находится оценка ошибки параметрической идентификации. Графические построения приведены на рис. 2.

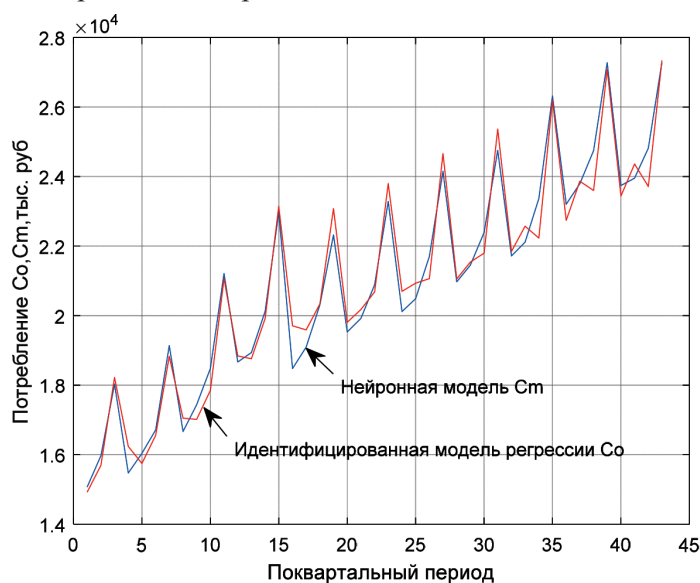


Рис. 2. Графики нейронной модели C_m функции потребления и ее идентифицированной модели C_0
Fig. 2. Graphs of the neural model C_m of the consumption function and its model C_0 identified by it

Операторный фрагмент программы, реализующей операцию «пригонки» функции потребления к ее нейронной модели:

```
% Вектор начального приближения
x0=[0.01 0.01 0.01]';
lb=zeros(3,1); ub=[];
evcm=norm([Y-Cm'],2)
t=1:43;
xdata=t';
ydata=Cm';
% Оценка элементов вектора x:
x=lsqcurvefit(@(x,xdata)myfun1(x,xdata,K,L),x0,xdata,ydata,lb,ub)
```

В приведенном фрагменте файл-функция представлена в следующем виде:

```
function F=myfun1(x,xdata,K,L)
```

Результатами «пригонки» кривой, описываемой функцией F под значения C_m , является вектор коэффициентов $x = [x(1) \ x(2) \ x(3)]^T$ (в полном формате):

$x =$

$1.0\text{e}+03 \cdot$

1. 405280027580972

0. 000364809544186

0. 000479040339765

>>

наилучшим образом подгоняющих нелинейную функцию F (в файл-функции *function*) к выходным данным C_m используемой модели нейросети. Отсюда численные оценки искомых коэффициентов модели (6) с учетом множителя 10^3 можно записать в виде вектора-столбца (в коротком формате):

$$x = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 1.4053 \\ 0.0004 \\ 0.0005 \end{bmatrix},$$

в котором они соответствуют значениям: $a_0 = x(1) = 14053$; $a_1 = x(2) = 0,4$; $a_2 = x(3) = 0,5$.

Таким образом, все коэффициенты идентифицируемой функции потребления определены.

Результаты (Results)

В результате параметрической оценки по методу наименьших квадратов кривой регрессии, построенной путем «пригонки» к модели потребления C_m с помощью обобщенно-регрессионной нейронной сети по данным статистики, получим математическую модель идентифицированной (регрессионной) функции потребления вида

$$C_0 = 1405 + 0,4(YD/PC) + 0,5C(-1).$$

На рис. 2 приведены кривые, визуальнo отображающие степень «пригонки» (аппроксимации) идентифицированной (регрессионной) модели C_0 функции потребления по ее нейросетевой модели C_m на том же временном интервале.

На основе полученных результатов построения функции регрессии C_0 и нейронной модели C_m можно оценить качество регрессии с помощью численной оценки средней ошибки аппроксимации по относительному отклонению (расхождению) кривых на поквартальном интервале 2003–2013 гг. по формуле

$$\delta_c = \frac{\sum_{i=1}^{n=43} (|C_i - C_0| / C_i)}{n} 100 \%.$$

Для построенных кривых моделей регрессии C_0 и нейросети C_m (см. рис. 2) величина этого расхождения (ошибки аппроксимации) составляет $\delta_c = 1,94425 \%$, т. е. ошибка параметрической оценки регрессионной модели не превосходит 2 %, что свидетельствует о высоком качестве параметрической идентификации.

Обсуждение (Discussion)

В работе рассмотрен алгоритм параметрической идентификации моделей функции потребления с применением обобщенно-регрессионной нейронной сети, предусматривающий построение модели регрессии по статистическим данным потребительских расходов и последующую оценку ее параметров. Моделирование выполнялось на основе адаптированного для использования русскоязычного пользователя пакета STATISTICA Neural Networks среды MATLAB. Приведена методология и разработан алгоритм обучения нейронной сети для распознавания динамики процесса потребительских расходов по данным статистики и построения его нейронной модели. Произведено оценивание ее параметров через евклидову норму ошибки путем «пригонки» нейронной модели функции потребления к заданному множеству статистических данных по методу наименьших квадратов. Выполнен анализ качества параметрической идентификации по показателю средней ошибки аппроксимации кривой регрессии функции потребления ее нейронной модели, построенной по данным статистики, и подтверждена высокая эффективность предложенного алгоритма.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Преимуществом использования нейросетевых методов регрессионного анализа из пакета STATISTICA Neural Networks MATLAB является возможность анализа данных статистики с целью диагностирования состояния региональной инфраструктуры производства, потребления и выявления факторов роста промышленного производства, а также проверки достоверности их соответствия реальным экономическим показателям развития.
2. Нейронные модели могут успешно применяться для параметрической идентификации моделей функций потребления заданной структуры, обеспечивая наилучшие оценки регрессии по методу наименьших квадратов, что обеспечивает достоверность используемой модели и данных статистики экономического развития инфраструктуры, используемых для принятия обоснованных управленческих решений.
3. Алгоритм параметрической идентификации регрессионных моделей по данным статистики с применением нейросетевых технологий может быть использован в отрасли речного и морского флота для формирования значений целевых индикаторов и показателей на краткосрочном и стратегическом уровнях ее развития. Это позволит обеспечить повышение эффективности управленческих решений в выработке согласованной последовательности взаимодействия и ритмичности работы различных отраслей промышленности с данной отраслью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макконнелл К. Р. Экономикс: принципы, проблемы и политика: учебник / К. Р. Макконнелл, С. Л. Брю, Ш. М. Флинн; пер. с англ. — 19-е изд. — М.: ИНФРА-М, 2018. — 1056 с.
2. Аветисян Т. В. Макроэкономика и цифровая экономика: вызовы и перспективы в условиях глобальных трансформаций: монография / Т. В. Аветисян, М. У. Базарова, М. А. Баниева, В. Э. Жажиева [и др.]. — Н. Новгород: НОО «Профессиональная наука», 2023. — 89 с.
3. Абель Э. Макроэкономика / Э. Абель, Б. Бернарке. — СПб.: Питер, 2010. — 768 с.

4. Полбин А. В. Оценка простой модели системы одновременных уравнений для российских макроэкономических показателей: монография / А. В. Полбин, С. Г. Синельников-Мурылев. — М.: Фонд «Институт экономической политики им. Е. Т. Гайдара», 2020. — 56 с.
5. Полбин А. К вопросу о долгосрочной взаимосвязи реального потребления домохозяйств с реальным доходом в РФ / А. Полбин, Н. Фокин // Экономическое развитие России. — 2017. — Т. 24. — № 10. — С. 6–16.
6. 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.: Изд. «Заневская площадь», 2022. — 520 с.
7. 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.
8. Суворов Н. В. Применение производственной функции Кобба – Дугласа для анализа промышленно-го 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/.
9. 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.
10. Воробьева Е. Ю. Оценивание параметров математической модели экономико-экологической задачи методом модулирующих функций / Е. Ю. Воробьева, Т. Ю. Пепеляева, В. Ю. Иванкин // Московский экономический журнал. — 2021. — № 1. — С. 26. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10030.
11. Пучков В. Ф. Методология построения математических моделей и оценка параметров динамики экономических систем: монография / В. Ф. Пучков, Г. В. Грацинская. — М.: Креативная экономика, 2011. — 240 с.
12. Козко А. И. Ограничения на значения функции потребления в модели экономического роста Рамсея – Касса – Купманса в случае стационарности функции сбережения / А. И. Козко, Л. М. Лукина, А. Ю. Попов, В. Г. Чирский // Чебышевский сборник. — 2021. — Т. 22. — № 2 (78). — С. 501–509. DOI: 10.22405/2226-8383-2021-22-2-501-509.

REFERENCES

1. McConnell, Campbell R., Stanley L. Brue, and Sean Masaki Flynn Dr. *Economics: Principles, Problems, & Policies*. 20th Edition. McGraw-Hill Education, 2014.
2. Avetisyan, T. V., M. U. Bazarova, M. A. Banieva, V. E. Zhazhieva, A. I. L'vovich, I. Ya. L'vovich, Ya. E. L'vovich, A. P. Preobrazhenskii, Yu. P. Preobrazhenskii, S. V. Sergeeva, T. E. Sitokhova, A. V. Tsydypova, E. V. Tsyrenov, and I. B. Tsyrenova. *Makroekonomika i tsifrovaya ekonomika: vyzovy i perspektivy v usloviyakh global'nykh transformatsii*. N. Novgorod: NOO «Professional'naya nauka», 2023.
3. Abel, Andrew, Ben Bernanke, and Dean Croushore. *Macroeconomics*. 9th Edition. Pearson, 2016.
4. Polbin, A. V., and S. G. Sinelnikov-Murylev. *A simple macro-econometric simultaneous equation model for the Russian economy*. M.: Fond «Institut ekonomicheskoi politiki im. E. T. Gaidara», 2020.
5. Polbin, A., and N. Fokin. “Note on cointegration relationship between real consumption and real income in Russia.” *Russian Economic Developments* 24.10 (2017): 6–16.
6. 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.: Izd. «Zanevskaya ploshchad'», 2022.
7. Sakharov, V. V., A. A. Kuz'min, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov na ob'ekтах vodnogo transporta v srede MATLAB: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015.
8. 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
9. 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.
10. Vorobeve, E. U., T. F. Pepelyaeva, and V. U. Ivankin. “Estimation of parameters of a mathematical model of economic and ecological problem by the method of modulating functions.” *Moscow Economic Journal* 1 (2021): 26. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10030.

11. Puchkov, V. F., and G. V. Gratsinskaya. *Metodologiya postroeniya matematicheskikh modelei i otsenka parametrov dinamiki ekonomicheskikh sistem*. M.: Kreativnaya ekonomika, 2011.

12. Kozko, A. I., L. M. Luzhina, A. Yu. Popov, and V. G. Chirskii. "Restrictions on the values of the consumption function in the Ramsey – Kass – Koopmans economic growth model in the case of a stationary saving function." *Chebyshevskii sbornik* 22.2(78) (2021): 501–509. DOI: 10.22405/2226-8383-2021-22-2-501-509.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Каск Ярослав Николаевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Терентьев Владислав Евгеньевич —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: puterentiev.v.e@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov, Alexandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Kask, Yaroslav N. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Terentiev, Vladislav E. —
PhD
Senior Researcher
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: puterentiev.v.e@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 марта 2024 г.

Received: March 3, 2024.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 16. № 2

2024 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 27.04.24. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 19,25. Тираж 500 экз. Заказ № 215/24

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7