

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

ВЕСТНИК

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

Том 15. № 3

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — Т. 15. — № 3. — 222 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

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

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

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

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

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

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

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

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



ISSN 2309-5180



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

Гл. редактор

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

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

Члены
редакционной
коллегии:

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,
ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 335**

Андреева Е. В., Тезиков А. Л. Использование фазовых диаграмм при выборе оптимальных маршрутов в акватории Севморпути 335

Гладков Г. Л., Ржаковская П. С. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла 344

Лентарёв А. А. Анализ существующих положений о сертификации и подготовке операторов автономных судов 359

Ююкин И. В. Сплайновый эталон картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической ситуационной осведомленности 374

Изотов О. А. Исследование логистической сферы доставки сборных грузов аналитическими методами 393

Васьков А. С., Мироненко А. А. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна 401

Данилов О. О. Особенности применения кранцевой защиты на безэкипажных портовых буксирах 416

Соловьева Е. Е., Маликова Т. Е. Выбор оптимальной последовательности сигналов блока управления при обработке штабеля контейнеров на морском терминале 426

Ксенофонтов Н. М., Лошак В. Н. Оценка возможности изменения периодичности контроля остаточных толщин элементов ворот и затворов судоходных шлюзов 437

Онищенко И. С., Каретников В. В. Назначение эксплуатационных ограничений для судов портового плавания на внутренних водных путях 455

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ
ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 464**

Жуков В. А., Степанов Е. А., Ерофеев В. Л. Оценка эффективности подогрева воздуха противообледенительного устройства ледокола на входе в компрессор 464

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.

Высоцкий В. Е. Вентильные двигатели с постоянными магнитами в системах судового электропривода: состояние и перспективы 476

Покусаев М. Н., Грабарчук А. Ю., Хоменко Т. В. Моделирование образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля многотопливных систем..... 490

Ватолин Д. С. Оценка эффективности топливоподготовки на судах, использующих в качестве топлива сжиженный природный газ 501

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВАМИ 513**

Чертков А. А. Алгоритм автоматизации метода проверки статистических гипотез по критерию Пирсона средствами MATLAB 513

Костин А. С., Майоров Н. Н. Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов..... 524

Добровольская А. А. Исследование модели оценки загруженности инфраструктуры морского пассажирского порта с помощью моделей принятия решений при неопределенности..... 537

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 335

Andreeva E. V., Tezikov A. L. The use of phase diagrams when choosing optimal routes in the waters of the Northern Sea Route 335

Gladkov G. L., Rzhakovskaya P. S. Hydraulic characteristics of the river flow and sediment transport conditions in the downstream pool of the hydroelectric complex 344

Lentarev A. A. Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators 359

Yuyukin I. V. Spline standard of mapped informativeness of correlation-extreme navigation as the potential of cybernetic situational awareness 374

Izotov O. A. Research of the logistics sphere for combined cargoes delivery by the analytical methods 393

Vas'kov A. S., Mironenko A. A. Planning and control of the ship curvilinear route 401

Danilov O. O. Features of fender protection application on uncrewed port tugs 416

Soloveva E. E., Malikova T. E. The selection of the control unit optimal signalling sequence in containers stack handling at sea port terminal..... 426

Ksenofontov N. M., Loshak V. N. Assessing the possibility of changing the monitoring frequency of the residual thicknesses of the navigation locks gates elements..... 437

Onishchenko I. S., Karetnikov V. V. Designation of operational restrictions for harbour ships on inland waterways 455

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 464

Zhukov V. A., Stepanov A. E., Erofeev V. L. Evaluation of the effectiveness of air heating of the icebreaker anti-icing device at the compressor inlet 464

Volume 15. № 3

2023

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

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

Members of the editorial board:

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

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

O. K. Bezyukov,
Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,
Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,
Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,
Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,
Doctor of Technical Sciences

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

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

M. A. Kolosov,
Doctor of Technical Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

V. B. Chistov,
Doctor of Technical Sciences

Vysotsky V. E. Brushless direct current motors with permanent magnets
for marine electric drive systems: state and prospects..... 476

Pokusaev M. N., Grabarchuk A. Y., Khomenko T. V. Simulation
of the harmful emissions formation in the exhaust gases of marine diesel
of multi-fuel systems..... 490

Vatolin D. S. Efficiency of fuel gas supply on LNG-fueled vessels..... 501

**AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES AND PRODUCTIONS 513**

Chertkov A. A. Algorithm for automation of the method of testing
statistical hypotheses according to the Pearson criterion by the means
of MATLAB..... 513

Kostin A. S., Maiorov N. N. Research of models and methods for routing
and practical implementation of autonomous movement by unmanned
transport systems for cargo delivery 524

Dobrovolskaia A. A. Research of the model for assessing the workload
of passenger port infrastructure using decision-making models under
uncertainty..... 537

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-335-343

THE USE OF PHASE DIAGRAMS WHEN CHOOSING OPTIMAL ROUTES IN THE WATERS OF THE NORTHERN SEA ROUTE

E. V. Andreeva, A. L. Tezikov

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

A method for choosing optimal shipping routes using phase diagrams is developed in the paper. The topic and purpose of the study is directly related to the tasks, the implementation of which is provided for by the Plan of the Northern Sea Route Development, approved by the decree of the Government of the Russian Federation on August 1, 2022, confirmed by the financing program for the development and implementation of the digital platform of the Northern Sea Route, approved by the Government in mid-January 2023. The assessment of the current state of the shipping routes network, navigation, hydrographic and hydro meteorological support is given. The use of the method of multi-criteria evaluation of alternative routes based on a variety of safety criteria depending on the depths, ice conditions, tightness of the water area and hydrographic study of the bottom relief is justified. The dependence of the safety criteria on the draft of the vessel, its icebreaking ability and maneuverable elements is established. A method of comparative assessment of shipping routes for settlement vessels according to four main criteria has been developed. A scheme for calculating quantitative safety indicators is proposed. A procedure for normalizing indicators has been developed. A three-level scale for assessing the safety of shipping routes has been introduced. A methodology for ranking shipping routes and culling the routes assessed as dangerous and forming a set of routes assessed as safe is proposed. The method was tested using a model of the passage of an Arc4 ice category vessel with a draft of 9 m along eight alternative routes of the East Siberian Sea. A set of phase diagrams of alternative routes constructed according to pairs of basic safety criteria is presented. The states of routes are analyzed with the application of the Pareto efficient solution rule to the selection of optimal routes. It is noted that the use of phase diagrams can be extended to a larger number of indicators affecting the efficiency and safety of vessels navigation. Recommendations on the use of the developed method are given. The main directions of further research are determined.

Keywords: Northern Sea Route, shipping routes, safety criteria, transit time, Pareto optimization, phase diagrams.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V., and Aleksandr L. Tezikov. "The use of phase diagrams when choosing optimal routes in the waters of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): xx–xx. 335–343. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-335-343.

УДК 528.47

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В АКВАТОРИИ СЕВМОРПУТИ

Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков

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

Темой исследования является разработка метода выбора оптимальных судоходных маршрутов с использованием фазовых диаграмм. Тема и цель исследования напрямую связаны с задачами, реализация которых предусмотрена планом развития Северного морского пути, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации 1 августа 2022 г. в соответствии с программой финансирования работ

по разработке и внедрению цифровой платформы Северного морского пути, утвержденной Правительством в январе 2023 г. Дана оценка современного состояния сети судоходных маршрутов, навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения. Обосновано использование метода многокритериальной оценки альтернативных маршрутов по множеству критериев безопасности, зависящих от глубин, ледовых условий, стесненности акватории и гидрографической изученности рельефа дна. Установлена зависимость критериев безопасности от осадки судна, его ледопроеходимости и маневренных элементов. Разработан метод сравнительной оценки судоходных маршрутов для расчетных судов по четырем основным критериям. Предложена схема вычисления количественных показателей безопасности. Разработана процедура нормировки показателей. Введена трехуровневая шкала оценки безопасности судоходных маршрутов. Предложена методика ранжирования судоходных маршрутов и отбраковки маршрутов, оцениваемых как опасные, а также формирования множества маршрутов, оцениваемых как безопасные. Апробация метода выполнена с использованием модели перехода судна ледовой категории Arc4, имеющего осадку 9 м по восьми альтернативным маршрутам Восточно-Сибирского моря. Представлен комплект фазовых диаграмм альтернативных маршрутов, построенных по парам основных критериев безопасности. Проанализированы состояния маршрутов с применением правила эффективного решения Парето к выбору оптимальных маршрутов. Отмечается, что использование фазовых диаграмм может быть распространено на большее количество показателей, влияющих на эффективность и безопасность плавания судов. Даны рекомендации по использованию разработанного метода. Определены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, арктическое судоходство, судоходные маршруты, критерии безопасности, время перехода, Парето оптимизация, фазовые диаграммы.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Использование фазовых диаграмм при выборе оптимальных маршрутов в акватории Севморпути / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 335–343. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-335-343.

Введение (Introduction)

Арктическое судоходство представляет собой часть морского судоходства, на которое распространяются общие правила безопасности мореплавания. Вместе с тем плавание в высоких широтах имеет ряд специфических особенностей, которые в полярном судоходстве являются особо тяжелыми и опасными видами мореплавания. К ним относятся: обширные мелководные области с опасными глубинами, тяжелые ледовые условия, недостаточная гидрографическая изученность рельефа дна, а также недостаточно развитая инфраструктура.

Арктическое судоходство играет важнейшую роль в решении стратегических задач Российской Федерации. Распоряжением Правительства 1 августа 2022 г. был утвержден «Обновленный план развития Северного морского пути (СМП) до 2035 г.» [1] (далее — План), направленный на создание условий обеспечения круглогодичной навигации в акватории арктических морей и запланированного увеличения объема морских перевозок между азиатскими портами и портами РФ [2]. План предусматривает строительство ледоколов, гидрографических судов усиленного ледового класса, земснарядов, а также проведение комплекса мероприятий, направленных на обеспечение безопасности и повышение эффективности арктической транспортной системы.

Госкорпорацией «Росатом» разработана концепция единой цифровой платформы СМП, предназначенной для сбора информации о состоянии арктической транспортной системы и решения задач повышения ее эффективности [3]. Важное место отводится решению задачи выбора оптимальных маршрутов плавания судов, отвечающих требованиям безопасности, предсказуемости и экономической выгоды. Научная и практическая новизна задачи выбора оптимальных маршрутов определяется отсутствием опыта круглогодичной навигации в акватории СМП за исключением юго-западной части Карского моря, где круглогодичная навигация осуществляется с 2006 г., а также отсутствием достоверных прогнозов ледовой обстановки морей центрального и восточного секторов акватории СМП. Плавание судов в этих секторах СМП выполняется по рекомендованным маршрутам в летне-осенний навигационный период (с середины июля до середины ноября) [4], проложенным по участкам с хорошей гидрографической изученностью рельефа дна. Рекомендованные маршруты

представляют собой оптимальные маршруты для судов с заданной осадкой в летне-осенний навигационный период при отсутствии льда.

В зимне-весенний навигационный период (с середины ноября до середины июля) использование летних рекомендованных маршрутов становится невозможным, так как они покрываются толстыми льдами и могут перекрываться непреодолимыми препятствиями в виде айсбергов, торосов, стамух и других опасных ледовых образований [5]. В таких условиях суда вынуждены отклоняться в область малых глубин с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна [6].

Выбор оптимального маршрута плавания судов в летне-осенний навигационный период сводится к решению задачи выбора самого короткого пути из имеющихся рекомендованных маршрутов для судов с заданной осадкой [7]. Используются два критерия оптимальности: критерий времени перехода и критерий безопасности по глубине. Выбор оптимального маршрута в зимне-весенний период должен выполняться с использованием большего количества критериев: критерия времени перехода, критерия безопасности по глубине, критерия стесненности и критерия гидрографической изученности. Обоснование необходимости использования указанных критериев при выборе оптимальных маршрутов выполнено в работах [8]–[11]. Задача выбора оптимальных маршрутов в ледовых условиях относится к многокритериальным [12]. Решение таких задач, как правило, сводится к поиску некоторого множества альтернативных решений, каждое из которых может быть оптимальным по одному критерию, но неоптимальным по другим. Принятие решения упрощается с использованием фазовых диаграмм состояния маршрутов по критериям безопасности.

Целью работы является построение фазовых диаграмм состояния маршрутов по критериям безопасности и их использование при выборе оптимальных судоходных маршрутов в акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 1 показана схема района, расположенного между Новосибирскими островами и проливом Лонга.

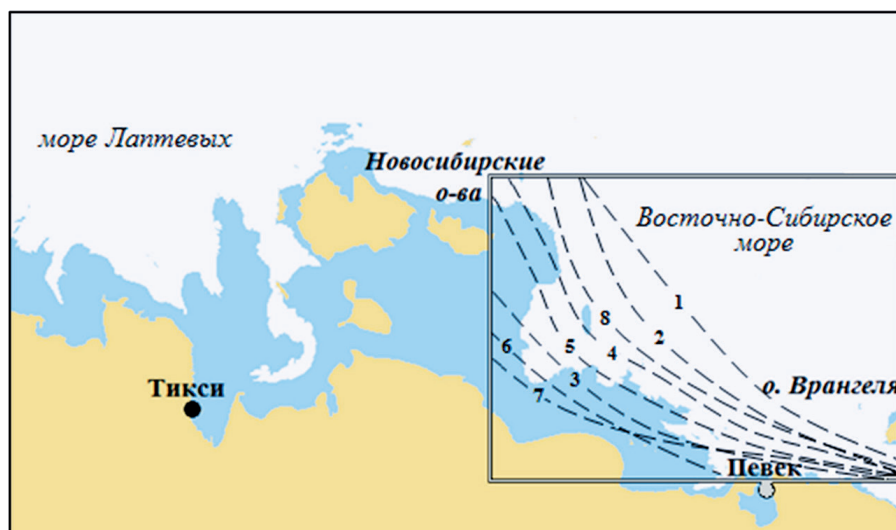


Рис. 1. Район расположения альтернативных маршрутов

Решается задача выбора оптимального маршрута из восьми альтернативных. Расположение маршрутов с их нумерацией показано в окне на рис. 1. Оценка безопасности маршрутов выполняется для судов, имеющих класс ледового усиления Arc4 и осадку 9,0 м, в начале зимней навигации (ноябрь). Параметры альтернативных маршрутов приведены в таблице.

Параметры альтернативных маршрутов

Маршрут, r	Параметры маршрута						
	Глубины минимальные	Толщина льда максимальная	Время перехода	Показатели безопасности			
	$Z_{\min}$, м	$h_{\max}$, см	T , ч	f_1	f_2	f_3	f_4
1	45	30	50	0,80	0,50	0,6	0,6
2	30	40	56	0,70	0,33	0,4	0,8
3	13	40	58	0,31	0,33	0,2	0,4
4	20	20	43	0,55	0,67	0,8	0,6
5	18	20	45	0,50	0,67	0,5	0,5
6	14	25	47	0,35	0,58	0,2	0,3
7	10	30	50	0,10	0,50	0,5	0,2
8	23	50	64	0,61	0,17	0,5	0,5

Протяженность каждого маршрута составляет 520–560 миль. Каждый маршрут характеризуется значением минимальной глубины $Z_{\min}$ и максимальной толщиной льда $h_{\max}$. Маршрут r_7 представляет собой самый мелководный маршрут, маршрут r_1 — самый глубоководный.

В зимний навигационный период ледопроездимость $h_{\text{лп}}$ судов ледовой категории Arc4 составляет 60 см [13], что позволяет им совершать самостоятельное плавание по всем маршрутам, максимальная толщина льда на которых находится в диапазоне от 20 см (маршруты r_4 и r_5) до 50 см (маршрут r_8). Расчетное время перехода по маршрутам меняется от 43 ч (маршрут r_4) до 64 ч (маршрут r_8). Каждый маршрут оценивается по четырем показателям безопасности:

f_1 — показателю безопасности по соотношению осадки судна d и минимальной глубины $Z_{\min}$;
 f_2 — показателю безопасности по соотношению ледопроездимости $h_{\text{лп}}$ судна и максимальной толщины льда $h_{\max}$;

f_3 — показателю безопасности по соотношению ширины полосы безопасного маневрирования судна B_0 и минимальным значением ширины фарватера $B_{\min}$;

f_4 — показателю безопасности по соотношению междугалсового расстояния $L_{\text{ф}}$, используемому при выполнении промерных работ в районе, и междугалсового расстояния L_0 , которое необходимо использовать для обнаружения опасных глубин в районе.

Каждый из указанных показателей безопасности f_1, f_2, f_3 и f_4 определен на интервале $[0, 1]$. При этом значение 0 соответствует максимальной степени опасности маршрута по принятому показателю, значение 1 — максимальной степени безопасности маршрута по принятому показателю.

На практике для каждого показателя принимается трехуровневая шкала безопасности:

I уровень (опасный) — $0 \leq f_i \leq f_i^{*\min}$;

II уровень (относительно безопасный) — $f_i^{*\min} < f_i < f_i^{*\max}$;

III уровень (наивысшая степень безопасности) — $f_i^{*\max} \leq f_i \leq 1$, где $f_i^{*\min}$ и $f_i^{*\max}$ — пороговые значения показателя f_i .

Для оценки маршрутов примем следующие пороговые значения: $f_i^{*\min} = 0,2$ и $f_i^{*\max} = 0,8$. В соответствии с принятой шкалой оценок к опасному состоянию по показателю f_1 относится маршрут r_7 , к опасному состоянию по показателю f_2 — маршрут r_8 , к опасному состоянию по показателю f_3 — маршруты r_3 и r_6 , к опасному состоянию по показателю f_4 — маршрут r_7 . К наиболее безопасному маршруту по показателю f_1 относится маршрут r_1 , по показателю f_2 к наиболее безопасным маршрутам — маршруты r_4 и r_5 , к наиболее безопасному маршруту по показателю f_3 — маршрут r_4 , к наиболее безопасному маршруту по показателю f_4 — маршрут r_1 . Поиск оптимального маршрута из восьми альтернативных маршрутов по четырем показателям производить сложно из-за обилия вариантов и противоречивых оценок. Для оценки маршрутов примем следующие пороговые значения: $f_i^{*\min} = 0,2$ и $f_i^{*\max} = 0,8$.

Результаты (Results)

Фазовая диаграмма альтернативных маршрутов по показателям f_1 – f_2 приведена на рис. 2. На диаграмме f_1 – f_2 заштрихованные области соответствуют I уровню шкалы безопасности. В опасные области по показателям f_1 и f_2 попадают маршруты r_8 и r_7 , которые выделены кругами.

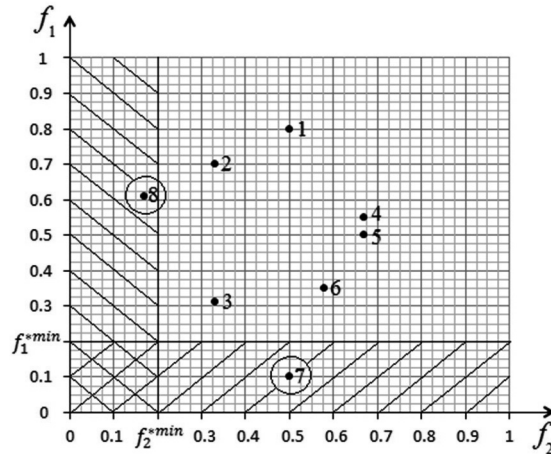


Рис. 2. Фазовая диаграмма f_1 – f_2

Маршруты $r_1, \dots, r_6$ по показателям f_1 и f_2 относятся к безопасным маршрутам. По показателю f_1 маршрут r_1 доминирует над всеми безопасными маршрутами. По показателю f_2 доминирующее положение занимают маршруты r_4 и r_5 . В соответствии с принципами решения многокритериальных задач [13] для выбора оптимального маршрута следует использовать маршруты r_1 и r_4 .

На рис. 3 приведена фазовая диаграмма f_1 – f_4 . На диаграмме f_1 – f_4 в опасные области попадает маршрут r_7 по показателям f_1 и f_4 . Точка, соответствующая маршруту r_7 , на диаграмме выделена кругом. Ранее на диаграмме f_1 – f_2 состояние маршрута r_7 , было отнесено к опасному состоянию по показателю f_1 .

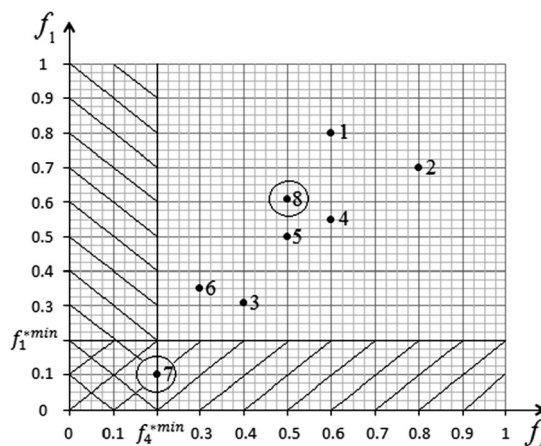


Рис. 3. Фазовая диаграмма f_1 – f_4

Маршруты $r_1, \dots, r_6$ и r_8 по показателям f_1 и f_4 относятся к безопасным маршрутам, однако точка, соответствующая маршруту r_8 , ранее была отнесена к опасному маршруту по показателю f_2 (см. рис. 2). По показателю f_1 маршрут r_1 доминирует над всеми безопасными маршрутами. По показателю f_4 доминирующее положение занимает маршрут r_2 . В соответствии с принципами решения многокритериальных задач для выбора оптимального маршрута следует использовать маршруты r_1 и r_2 .

На рис. 4 приведена фазовая диаграмма f_1-f_3 . На ней в опасные области попадают маршруты r_3 , r_6 и r_7 по показателям f_1 и f_3 . Маршруты r_7 и r_8 ранее по диаграммам f_1-f_2 и f_1-f_4 были отнесены к опасным маршрутам. Все опасные маршруты по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 выделены на рисунке кружками.

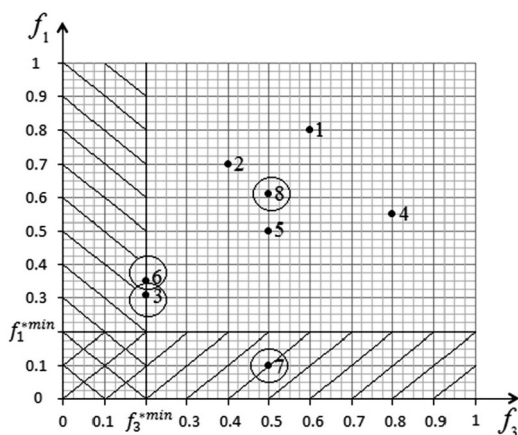


Рис. 4. Фазовая диаграмма f_1-f_3

Маршруты r_1, r_2, r_4, r_5 и r_8 по показателям f_1 и f_3 относятся к безопасным маршрутам, однако точка, соответствующая маршруту r_8 , ранее была отнесена к опасному маршруту по показателю f_2 (рис. 2). По показателю f_1 маршрут r_1 доминирует над всеми безопасными маршрутами. По показателю f_3 доминирующее положение занимает маршрут r_4 . В соответствии с принципами решения многокритериальных задач для выбора оптимального маршрута следует использовать маршруты r_1 и r_4 .

На рис. 5 приведена фазовая диаграмма f_2-f_3 , на которой в опасные области попадают маршруты r_3, r_6 и r_8 . Маршруты r_1, r_2, r_4, r_5 и r_7 по показателям f_2 и f_3 относятся к безопасным маршрутам. Однако маршрут r_7 ранее по диаграммам f_1-f_2, f_1-f_4 и f_1-f_3 был отнесен к опасному маршруту. Все опасные маршруты по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 выделены кружками.

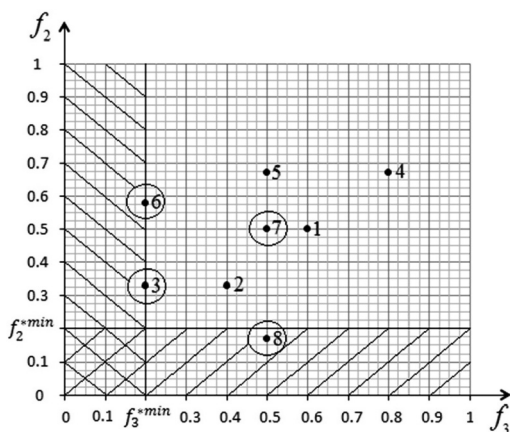


Рис. 5. Фазовая диаграмма f_2-f_3

По показателю f_2 маршруты r_4 и r_5 равнозначны и доминируют над всеми безопасными маршрутами. По показателю f_3 доминирующее положение занимает маршрут r_4 над всеми безопасными маршрутами. В соответствии с принципами решения многокритериальных задач для выбора оптимального маршрута следует использовать маршрут r_4 . На основании анализа маршрутов по всем показателям безопасности к множеству Парето оптимальных [13] маршрутов относятся безопасные маршруты r_1, r_2, r_4 и r_5 .

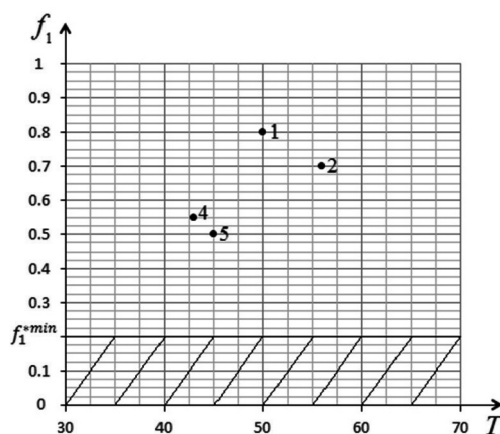


Рис. 6. Фазовая диаграмма f_1-T

На рис. 6 приведена фазовая диаграмма f_1-T . Маршрут r_4 характеризуется минимальным значением времени перехода (43 ч), что обеспечивает его доминирование над остальными маршрутами. Маршрут r_2 характеризуется максимальным временем перехода. К множеству Парето оптимальных маршрутов по параметрам f_1 и T относятся маршруты r_1 и r_4 .

Обсуждение (Discussions)

Полученные в ходе моделирования результаты хорошо согласуются с данными реального судоходства. Вместе с тем следует отметить, что проверка метода выбора оптимальных маршрутов выполнялась для одного типа судов при определенном состоянии ледовых условий в акватории. В модели использовались локальные фрагменты судоходных маршрутов, поэтому полученные оценки и заключения относятся только к этим фрагментам и не могут без дополнительного обоснования быть распространены на участки маршрутов, расположенные вне границ фрагмента. Использование фазовых диаграмм альтернативных маршрутов обеспечивает наглядное представление процедуры отбраковки маршрутов по частным критериям и формирование множества Парето оптимальных маршрутов, которое может быть использовано для принятия окончательного решения.

На точность и обоснованность решения оказывает влияние полнота и достоверность информации, используемой для вычисления показателей безопасности, а также ряд допущений, относящихся к методам оценки показателей безопасности и их использованию. В качестве допущений принималось, что все используемые показатели имеют одинаковые значения. Кроме того, не учитывался ряд других факторов, влияющих на оценку маршрутов по критериям безопасности, к которым может быть отнесено влияние ветра, течения, плотность судоходства, удаленность от пунктов размещения морской спасательной службы и др. Применение фазовых диаграмм может быть распространено на большее количество показателей безопасности, влияющих на эффективность и безопасность плавания судов. Фазовые диаграммы могут использоваться при проработке перехода конкретного судна, а также при проработке переходов групп разнотипных судов, выполняемой в штабах морских операций.

Заключение (Conclusion)

Проблема круглогодичной навигации в акватории Северного морского пути связана с решением комплекса многокритериальных задач, в перечень которых входят оптимизация структуры и состава полярного флота, совершенствование всех видов информационного обеспечения, разработка методов прогнозирования ледовых условий, проведение гидрографических и дноуглубительных работ, развитие морской транспортной инфраструктуры. Успешное решение указанных задач позволит обеспечить надежную и безопасную перевозку грузов и товаров для людей, живущих в районах Крайнего Севера, а также создание условий для реализации инвестиционных проектов в Арктической зоне страны [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р. «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/46171/> (дата обращения: 30.01.2023).
2. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 30.01.2023).
3. «Росатом» создаст цифровую платформу для навигации по Севморпути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/08/03/880554-rosatom-platformu> (дата обращения 30.01.2023).
4. Постановление Правительства РФ от 18.09.2020 N 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rostransnadzor.gov.ru/documents/categories/79/document/3805> (дата обращения 30.01.2023).
5. Порубаев В. С. Максимальная осадка килей гряд торосов в глубоководной части Северного Ледовитого океана / В. С. Порубаев // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2014. — № 2 (100). — С. 75–81.
6. Тезиков А. Л. Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.
7. 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.
8. Ольховик Е. О. Влияние льда на формирование судоходных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик, Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.
9. Ключев В. В. Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути / В. В. Ключев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.
10. Решетняк С. В. Северный морской путь. Численная оценка гидрографической обеспеченности трасс для судов с большой осадкой / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Геодезия и картография. — 2008. — № 6. — С. 59–61.
11. Ершов А. А. Использование характеристик маневрирования для обеспечения безопасности движения судов в узкостях / А. А. Ершов, А. В. Михневич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.
12. Андреева Е. В. Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
13. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде / В. Д. Ногин. — М.: Физматлит, 2005. — 176 с.

REFERENCES

1. Rasporiyazhenie Pravitel'stva RF ot 1 avgusta 2022 g. № 2115-r. «Ob utverzhdenii plana razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 g. Web. 30 Jan. 2023 <<http://government.ru/news/46171/>>.
2. Ukaz Prezidenta RF ot 7 maya 2018 goda № 204 «O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2024 goda». Web. 30 Jan. 2023 <<http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>>.
3. «Rosatom» sozdaet tsifrovuyu platformu dlya navigatsii po Sevmorputi. Web. 30 Jan. 2023 <<https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/08/03/880554-rosatom-platformu>>.
4. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 18.09.2020 N 1487 «Ob utverzhdenii Pravil plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti». Web. 30 Jan. 2023 <<https://rostransnadzor.gov.ru/documents/categories/79/document/3805>>.
5. Porubayev, V. S. “Maximum draft of ice ridge keels in the deep-sea area of the Arctic Ocean.” *Arctic and Antarctic Research* 2(100) (2014): 75–81.

6. Tezиков, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. "The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area." *Transport business of Russia* 2(75) (2018): 19–21.
7. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
8. Olkhovik, Evgeniy Olegovich, Ekaterina Valerievna Andreeva, and Aleksandr Lvovich Tezиков. "Ice influence on forming shipping routes in the water area of the Northern Sea Route." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2019): 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.
9. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. "Formalization of the assessment of safety of routes of the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 69–74.
10. Reshetnyak, S. V., and A. L. Tesikov. "Northern seaway. Numerical evaluation of the hydrographic provision of routes for the high draught vessels." *Geodesy and Cartography* 6 (2008): 59–61.
11. Ershov, Andrey A., and Andrey V. Mikhnevich. "The use of characteristics of maneuvering to ensure the safety of vessel traffic in the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.
12. Andreeva, Ekaterina V. "Multi-criteria approach to the problem of choosing the optimal routes in the waters of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
13. Nogin, V. D. *Prinyatie reshenii v mnogokriterial'noi srede*. M.: Fizmatlit, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Тезиков Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: altezиков@yandex.ru, TezиковAL@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Tezиков, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: altezиков@yandex.ru, TezиковAL@gumrf.ru

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

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE RIVER FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT CONDITIONS IN THE DOWNSTREAM POOL OF THE HYDROELECTRIC COMPLEX

G. L. Gladkov, P. S. Rzhakovskaya

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

In this paper, the navigable section of the Svir River, located in the lower reaches of the Nizhne-Svirsky hydroelectric complex, is considered. Special in-situ observations were made in this section to study the hydraulic regime of the river flow under the conditions of unsteady water movement. The study has showed that the kinematic characteristics of the flow in the downstream pool vary with the distance from the site of the waterworks and depend on the regime of the discharge flows. The nature of the transformation of releases in the downstream under open channel and ice conditions has been studied. The values and intensity of changes in the main characteristics of the river flow during the propagation of the tail water wave in the lower reaches such as the nature of changes in the level regime and the slopes of the free surface on the hydraulic structures, the regime of water flow velocities, have been evaluated. The main hydraulic parameters of the river flow such as the values of the Froude number, the Chézy's coefficient and the water flow modulus are determined. The character of changes in local and convective accelerations is studied and their contribution to the general value of energy losses along the stream length is evaluated. Numerical experiments make it possible to identify the peculiarities of sediment movement in conditions of unsteady water flow and to develop recommendations for modelling channel transformations in such conditions. It is found that during daily and weekly regulation of the river discharge, sediment transport is activated at the moment when a wave of daily water discharge is passing from the upstream reservoir of the hydroelectric power plant. At the same time, the basic parameters of sediment transport such as the speed of dune movement and sediment discharge increase in comparison with the stationary movement of the water.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, sediment discharge, parameters of dunes, Froude number, Chézy's coefficient, channel transformations.

For citation:

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 admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.

УДК 556.536

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНОГО ПОТОКА И УСЛОВИЯ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА

Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская

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

В работе рассматривается судоходный участок реки Свирь, расположенный в нижнем бьефе Нижне-Свирского гидроузла. На данном участке были проведены специальные натурные наблюдения по изучению гидравлического режима речного потока в условиях неустановившегося движения воды. Выполненные исследования показали, что кинематические характеристики потока в нижнем бьефе изменяются по мере удаления от створа гидроузла и зависят от режима сбросных расходов воды. Изучен характер трансформации попускового расхода воды в нижнем бьефе в условиях открытого русла и подо льдом. Выполнена оценка значений и интенсивности изменения основных характеристик речного потока при распространении волны пуща в нижнем бьефе: характера изменения уровня режима и уклонов свободной поверхности на гидростворах, режима скоростей течения воды. Определены основные гидравлические параметры речного потока: значения числа Фруда, коэффициента Шези и модуля расхода воды. Изучен

характер изменения локальных и конвективных ускорений и выполнена оценка их вклада в общую величину потерь энергии по длине потока. Численные эксперименты позволили выявить специфику движения наносов в условиях неустановившегося движения воды и разработать рекомендации для моделирования русловых переформирований в таких условиях. Установлено, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны суточного пускa воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов: скорость перемещения гряд и расход наносов, возрастают по сравнению со стационарным движением воды.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, число Фруда, коэффициент Шези, русловые переформирования.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Кинематическая структура потока и динамика морфологических изменений в нижнем бьефе гидроузла в условиях недельного и суточного регулирования речного стока представляют собой сложную картину. Характеристики неустановившегося движения воды изучались в лабораторных и натурных условиях в 60–70-е гг. прошлого столетия [1]–[3] в интересах гидроэнергетики. Выполненные исследования показали, что при прохождении волны пускa в нижнем бьефе гидроузла нарушается однозначная связь между расходами и уровнями воды, а моменты наступления максимальных значений уклона свободной поверхности, скорости течения воды, расхода и уровня воды не совпадают по времени.

Волна пускa расплывается по мере своего распространения от створа гидроузла вниз по течению реки, в результате чего амплитуды изменения величины пускового расхода воды и высоты волны пускa по длине реки уменьшаются. При прохождении волны пускa эпюра распределения скорости течения воды по вертикали трансформируется, причем наиболее сильные изменения в кинематике потока наблюдаются в непосредственной близости от створа гидроузла.

Гидравлические расчеты характеристик движения воды и переформирований дна в реках обычно выполняются путем решения известной системы уравнений, включающих уравнение неустановившегося неравномерного движения воды в реке, а также уравнения неразрывности и деформаций, которые замыкаются с помощью формулы коэффициента Шези и формулы расхода наносов. При численном моделировании русловых переформирований и составлении русловых прогнозов в реках используются теоретические основы динамики русловых потоков [4], [5], результаты гидравлических и гидроморфологических исследований [6]–[8], а также современный аппарат математического моделирования [9]–[11].

Величина гидравлического сопротивления движению воды в расчетах определяется обычно в зависимости от состава донных отложений и способа их перемещения [5], [12], [13], а величина расхода наносов вычисляется по одной из известных расчетных формул [4], [14], [15]. Гидравлические и экспериментальные исследования параметров транспорта наносов и русловых деформаций на гидравлических моделях и в реках проводились преимущественно в условиях установившегося движения воды [6], [16], [17]. Исследования кинематической структуры потока и русловых деформаций при неустановившемся режиме движения воды в нижних бьефах гидроузлов в последние годы проводились в ограниченных объемах [18], [19]. Вместе с тем проблемы обеспечения судоходства в нижних бьефах гидроузлов, расположенных вне зоны подпора, остаются по-прежнему актуальными [20]. До настоящего времени детальных исследований по вопросам изучения параметров транспорта наносов в нижних бьефах гидроузлов практически не проводилось.

Русловые прогнозы представляют практический интерес при инженерном обосновании вопросов строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры водного транспорта, при проведении

путевых мероприятий на судоходных реках, а также в других областях водопользования. В соответствии с рекомендациями МГУ им. М. В. Ломоносова [21]–[23] анализ руслового процесса в реках выполняется с учетом геоморфологических типов формирования русел и их морфодинамики. Проблема составления прогноза русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов в связи с неустановившимся характером движения воды представляется более сложной и требует проведения специальных натурных и экспериментальных исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе рассматривается участок реки Свирь, расположенный в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС. Река Свирь вытекает из Свирской губы Онежского озера и впадает в Ладожское озеро. Общее падение реки равно 27,5 м. Около 12 м, из которых в настоящее время используется Нижне-Свирской ГЭС (1933 г.), расположенной в 81 км от устья реки. На участке от створа гидроузла до устья река находится в подпоре от Ладожского озера. Падение свободной поверхности на этом участке составляет около 1,5 м.

На 128-м км от устья реки расположена Верхне-Свирская ГЭС, сданная в эксплуатацию в 1952 г. В створе гидроузла сосредоточено падение свободной поверхности величиной 14 м. Вышерасположенный участок реки, включая акваторию Онежского озера, находится в подпоре от этого гидроузла. В работе [1] представлены результаты детальных натурных исследований, выполненных на реке Свирь в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС с целью изучения гидрологического режима реки в условиях суточного регулирования речного стока.

Натурные измерения проводились в зимний и летний периоды времени. Для проведения наблюдений на участке реки длиной 59,5 км были разбиты шесть гидростворов и 22 уровенных поста. В процессе наблюдений в течение двух недельных циклов (один — зимой, один — летом) проводились систематические синхронные гидрометрические измерения скоростей течения воды на гидростворах и уровней воды на водпостах. В зависимости от фазы прохождения волны пуща временной шаг при выполнении измерений расходов воды изменялся в пределах от 15 мин до 1,0 ч.

Морфометрические характеристики речного русла были определены на 112 поперечниках, равномерно разбитых по длине участка исследований. Помимо наблюдений за уровнями и расходами воды в процессе исследований проводился отбор проб донных отложений, выполнялись гидрогеологические наблюдения за ходом уровней грунтовых вод при суточных колебаниях уровней воды в реке, метеорологические наблюдения за температурой воздуха и воды, а также за характеристиками ледяного покрова и механическими свойствами льда в зимнем цикле экспедиционных исследований.

Исходная система уравнений движения воды и неразрывности в одномерной постановке, используемая для решения поставленной задачи в общем случае неустановившегося неравномерного движения воды [4], записывается в следующем виде:

$$I = -\frac{\partial Z}{\partial l} = \frac{U^2}{C^2 H} + \frac{1}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial l} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t};$$

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

При выполнении расчетов гидравлических характеристик речного потока данные уравнения обычно решаются *методом конечных разностей*. Начальными условиями в данном случае служат распределения величины ширины русла $B_{(l,0)}$ и средней отметки дна $Z_{(l,0)}$ по длине потока на начальный момент времени $t = 0$. В качестве граничных условий на верхней границе расчетной области задается входной гидрограф, характеризующий ход сбросного расхода воды во времени $Q_{(0,t)}$, а на нижней границе — ход изменений уровня воды $Z_{(L,t)}$ во времени.

Надежность гидравлических расчетов в значительной степени зависит от точности определения величины потерь энергии по длине. В расчетной практике в ходе проведения вычислений

при установившемся движении воды величину коэффициента Шези обычно находят через коэффициент шероховатости по формуле Маннинга. Значения коэффициента шероховатости определяется подбором при калибровке и верификации модели по натурным данным при установившемся движении воды. Для случая неустановившегося движения таких рекомендаций в расчетной практике нет.

Экспериментальные и натурные исследования [6], [24], выполненные в гидравлических лотках и на реках с подвижными донными отложениями, показали, что размеры донных гряд изменяются с изменением расхода и уровня воды. Тесная прямая связь высоты донных гряд прослеживается с глубиной потока. В области малых глубин — в гидравлических лотках и малых водотоках, связь высоты гряд с глубиной потока оказалась сильнее, чем на крупных реках. При этом размеры гряд слабо зависят от крупности слагающих их частиц.

Материалы исследований, выполненных в гидравлических лотках с песчаными грядами, а также результаты их научного обобщения [4], [25], показали, что значение коэффициента Шези, отвечающее грядовому сопротивлению дна, оказалось обратно пропорциональным крутизне и относительной высоте гряд. В естественных русловых потоках величина сопротивления движению воды, обусловленная донными грядами, оказалась относительно больше, чем в гидравлических лотках. При этом определяющим фактором для оценки потерь энергии по длине в реках является длина гряд, точнее, шаг расположения водоворотных зон за гребнями гряд.

С увеличением расходов и уровней воды в реке параметры грядового рельефа возрастают, а потери энергии по длине потока уменьшаются. На спаде уровней воды наблюдается обратная картина. При неустановившемся движении воды скорость изменения высот гряд с меняющимся расходом воды в реке оказывается больше, чем скорость изменения их длин. В результате с ростом уровней воды крутизна гряд в потоке возрастает, а на спаде уменьшается.

Параметром, характеризующим величину расхода наносов в реке, является скорость перемещения донных гряд. Формула для вычисления среднего расхода наносов q_s , переносимого одной грядой, записывается в виде

$$q_s = (1 - \varepsilon) C_r \frac{\omega_r}{l_r} = (1 - \varepsilon) \sigma C_r h_r, \quad (2)$$

где ω_r — площадь продольного сечения гряды;

l_r — длина гряды;

h_r — высота гряды;

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

ε — коэффициент пористости донных отложений;

C_r — скорость перемещения гряды.

В работе [15] с использованием натурных и экспериментальных данных [26], [27] были получены расчетные формулы для вычисления основных характеристик параметров транспорта наносов: средних значений высоты и длины донных гряд в зависимости от глубины H речного потока. Расход наносов в данной работе вычислялся по формуле (1) по измеренным элементам движения донных гряд как произведение высоты гряды на скорость ее перемещения. Значения коэффициента полноты формы гряды и коэффициента пористости грунта в данных вычислениях принимались равными их средним значениям: $\sigma = \omega_r / l_r h_r = 0,6$ и $\varepsilon = 0,4$.

Полученная зависимость записывается в виде

$$q_s / HU = 0,0014 (U / \sqrt{gH})^{3,11}. \quad (3)$$

Установленная связь между расходом донных наносов и числом Фруда ($U / \sqrt{gH}$) оказалась достаточно тесной, с высоким коэффициентом корреляции. В настоящей работе эти расчетные зависимости будут использованы для проведения численного эксперимента при оценке параметров транспорта наносов в условиях неустановившегося движения воды.

На основании материалов специальных гидрологических исследований, выполненных в нижнем бьефе Нижне-Свирского гидроузла на реке Свири, результатов наблюдений за сбросными расходами

на гидроузле, данных почасовых и среднесуточных наблюдений за уровнями воды, скоростями течения воды и уклонами свободной поверхности на гидростворах, а также результатов численных экспериментов в настоящей работе решаются следующие задачи:

- изучить характер изменения сбросных расходов, скоростного и уровня режимов в нижнем бьефе гидроузла;
- выполнить анализ гидравлических характеристик речного потока: значений числа Фруда, коэффициента Шези, коэффициента шероховатости речного русла, параметров транспорта наносов, а также значений локальных и конвективных ускорений и изучить характер их изменения при прохождении волны попуска в нижнем бьефе гидроузла в период открытого русла и в зимних условиях при движении воды подо льдом.

Результаты (Results)

Каскад водохранилищ на реке Свирь расположен на основной трассе Волго-Балтийского водного пути. Водные ресурсы водохранилищ, кроме гидроэнергетики и водного транспорта, используются для жилищно-коммунального хозяйства, рыбного хозяйства и промышленности. Объем водохранилища Верхне-Свирской ГЭС составляет 295000 млн м³ (без учета объема Онежского озера), что позволяет осуществлять многолетнее, недельное и суточное регулирование стока. Объем водохранилища Нижне-Свирской ГЭС составляет 119 млн м³ и используется для суточного регулирования стока.

Для анализа параметров неустановившегося движения воды в нижнем бьефе гидроузла была выполнена обработка данных измерений на 1-, 2- и 4-м гидростворах, наблюдения на которых производились в зимний и в летний периоды проведения экспериментов [1]. Общая информация о характеристиках сбросных расходов воды приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сведения о режиме сбросных расходов воды

Гидроствор	Расстояние от гидроузла, км	Амплитуда попусковых расходов, м ³ /с	Средний попусковый расход, м ³ /с	Амплитуда уровней воды, м	Средняя отметка уровня воды, м
Зимняя серия наблюдений (13.02–17.02.61)					
Г/с 1	3,50	1222	462,16	4,48	16,48
Г/с 2	7,41	1233	496,14	4,29	16,38
Г/с 4	29,93	948	464,03	2,37	15,20
Летняя серия наблюдений (23.10–27.10.61)					
Г/с 1	3,50	1270	535,84	2,66	15,75
Г/с 2	7,41	1192	526,01	2,45	15,64
Г/с 4	29,93	1082	552,22	1,35	15,07

Табличные данные показывают, что при проведении экспериментов в летний период времени удалось воспроизвести режим сбросных расходов, аналогичный зимнему циклу. При этом средние значения амплитуды попусковых расходов для двух циклов измерений оказались практически равными. Амплитуда изменения уровней воды в створах постов летом оказалась в 1,6–1,7 раза меньше, чем зимой. Средние отметки уровней воды на постах в летнем цикле также оказались ниже, чем в зимний период наблюдений.

В табл. 2 приведены результаты обработки материалов гидрометрических измерений на гидростворах, выполненных в зимних и летних условиях за одни сутки (79–103 ч эксперимента). В таблице, наряду с данными о гидравлических и морфометрических характеристиках потока и русла реки, дополнительно приведены сведения о рассчитанных значениях числа Фруда, коэффициента Шези, модуля расхода воды и значениях расхода наносов, вычисленных по формуле (3). Расхождения гидравлических характеристик потока в нижнем бьефе гидроузла обусловлены различиями в условиях движения воды при открытом русле и зимой подо льдом. При движении воды подо льдом возрастает общая величина потерь энергии по длине. В результате суточная амплитуда изменения

отметок уровней воды при прохождении волны попуска становится больше, чем при открытом русле. Средние скорости течения воды на гидростворе № 1 зимой в течение суток изменяются в диапазоне 0,064–0,701 м/с. По мере удаления от створа гидроузла амплитуда суточных изменений скорости течения уменьшается почти в два раза.

В летний период скорости течения воды на всех гидростворах возрастают по сравнению с зимой. Максимальные суточные значения средней скорости течения воды вблизи гидроузла достигают значений порядка 1,0 м/с. На гидростворе № 4 суточная амплитуда изменения средней скорости течения при прохождении волны попуска составляет величину около 0,5 м/с, т. е. почти в два раза больше, чем зимой.

Таблица 2

Гидравлические характеристики речного потока по данным наблюдений

Гидравлический параметр потока	Диапазон изменения	Номер гидроствора					
		1		2		4	
		Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето
Расход воды, Q , м ³ /с	Макс.	1250	1270	1260	1220	1000	1130
	Мин.	66	40	100	67	292	190
	Средн.	622	640	669	641	653	674
Уровень воды, Z , м	Макс.	18,57	17,14	18,37	16,92	16,38	15,79
	Мин.	15,54	14,74	15,38	14,73	14,97	14,57
	Средн.	17,28	16,10	17,14	15,98	15,75	15,27
Средняя скорость, U , м/с	Макс.	0,701	0,97	0,72	0,86	0,65	0,68
	Мин.	0,064	0,05	0,088	0,073	0,26	0,16
	Средн.	0,366	0,48	0,40	0,47	0,48	0,45
Число Фруда, $U / \sqrt{gH}$ (–)	Макс.	0,106	0,160	0,100	0,127	0,100	0,099
	Мин.	0,011	0,010	0,014	0,012	0,045	0,025
	Средн.	0,053	0,076	0,055	0,069	0,077	0,068
Уклон, I , ‰	Макс.	0,178	0,103	0,164	0,085	0,094	0,056
	Мин.	0,003	0,003	0,007	0,003	0,028	0,011
	Средн.	0,039	0,034	0,067	0,035	0,064	0,036
Коэффициент Шези, $C / \sqrt{g}$ (–)	Макс.	12,01	16,87	10,26	14,72	10,57	14,37
	Мин.	4,30	5,26	3,30	7,39	8,07	8,37
	Средн.	9,22	12,55	7,33	11,76	9,62	11,30
Модуль расхода, $K = \omega C \sqrt{H}$, м ³ /с · 10 ⁴	Макс.	17,47	16,57	12,00	16,00	10,59	16,44
	Мин.	3,80	2,31	4,05	4,42	5,59	4,42
	Средн.	10,37	10,18	8,30	10,49	8,06	11,07
Расход наносов, q_s , м ² /сут	Макс.	0,3513	1,488	0,351	0,784	0,262	0,303
	Мин.	0,00	0,00	0,0007	0,00	0,007	0,0008
	Средн. ¹	0,0158	0,0707	0,0191	0,040	0,0415	0,0320
	Средн. ²	0,0620	0,2512	0,0584	0,150	0,0579	0,0695

¹ — средние значения по среднесуточным данным наблюдений;

² — средние значения по данным почасовых наблюдений.

Суточная амплитуда изменения числа Фруда при прохождении волны попуска подо льдом на гидростворе № 1 изменяется в десять раз в пределах от 0,011 до 0,10. По мере удаления от створа гидроузла она уменьшается примерно в два раза. На всех гидростворах максимальные значения числа Фруда выравниваются по длине рассматриваемого участка реки и составляют в среднем величину около 0,1. Диапазон минимальных значений числа Фруда составляет 0,01–0,045, причем относительно большие значения наблюдаются на гидростворах, удаленных от створа гидроузла.

В период открытого русла характер изменения данного параметра по длине реки и с изменением уровня воды изменяется. На гидростворе № 1 амплитуда суточного изменения числа Фруда

составляет порядка 0,01–0,16, т. е. возрастает в полтора раза по сравнению с зимним периодом. На гидростворе № 4, расположенном ниже по течению, эта величина уменьшается примерно в два раза. При этом максимальные значения данного параметра на гидростворе № 4 зимой и летом оказались практически равными.

Анализ характера изменений уклонов свободной поверхности при прохождении волны попуска позволил установить следующую картину. В зимний период максимальные значения уклонов на всех гидростворах в 1,7–1,9 раза больше, чем летом. По мере удаления от створа гидроузла уклоны уменьшаются примерно в два раза в обоих циклах наблюдений — как в зимний период, так и летом. На фазе прохождения обратной волны попуска в связи со значительной амплитудой изменения сбросного расхода в течение суток происходит опорожнение нижнего бьефа и уклоны свободной поверхности принимают значения, близкие к нулевым.

В процессе работы были выполнены тестовые расчеты по оценке величины потерь энергии по длине. В первом цикле вычислений величина потерь энергии находилась без учета конвективных и локальных ускорений, как это рекомендуется современной практикой [10] решения задач речной гидродинамики. Анализ изменения значений коэффициента Шези показывает, что максимальные значения данного параметра отвечают моментам прохождения волны попуска. При этом по длине реки максимальные значения коэффициента Шези монотонно убывают как в летний, так и в зимний периоды наблюдений. Минимальные значения коэффициента Шези на гидростворах имеют тенденцию к увеличению по длине реки. В период открытого русла коэффициенты Шези в среднем на 40 % больше, чем зимой, что свидетельствует об увеличении потерь энергии при движении воды подо льдом. При прохождении волны попуска значения величины коэффициента Шези на гидростворе изменяются (возрастают почти в два-три раза), причем наибольшая разница между минимальными и максимальными значениями отмечается на створах, расположенных ближе к гидроузлу.

Пропускная способность русла в данной работе оценивалась по величине модуля расхода воды. В целом характер изменения данного параметра как по длине реки, так и на гидростворах в момент прохождения волны попуска примерно соответствует ходу изменений коэффициента Шези. Отличия заключаются на гидростворе № 1, где несмотря на большие значения коэффициента Шези пропускная способность в период открытого русла оказалась меньше, чем зимой.

В зимний период интенсивность транспорта наносов становится меньше, чем летом. В непосредственной близости от створа гидроузла максимальная величина расхода наносов зимой оказалась в 4 раза меньше, чем в период открытого русла. В целом по длине реки, по мере удаления от створа гидроузла, интенсивность транспорта наносов уменьшается. При этом также сокращается разница между зимними и летними значениями расхода наносов.

Результаты численных экспериментов по оценке величины расхода наносов, выполненных по данным почасовых наблюдений, показывают, что в условиях неустановившегося движения воды происходит увеличение расхода наносов в 2–3,5 раза по сравнению с аналогичными вычислениями по среднесуточным параметрам. Наибольшие расхождения между почасовыми и среднесуточными данными наблюдаются в створах, расположенных в непосредственной близости от гидроузла. Активизация транспорта наносов при прохождении волны попуска отмечается на всех гидростворах, как в летний период наблюдений в условиях открытого русла, так и зимой при движении воды подо льдом.

На рис. 1 показаны хронологические графики изменения отметок уровней воды, сбросных расходов воды и рассчитанных значений коэффициентов шероховатости (по Маннингу) на гидростворах № 1, 2 и 4 в зимний и летний периоды наблюдений. Результаты выполненных вычислений показывают, что минимальные значения коэффициентов шероховатости русла отвечают моментам прохождения пиковых расходов воды. В летний период средние величины коэффициентов шероховатости на гидростворах изменяются в диапазоне 0,025–0,035 $\text{с/м}^{1/3}$. Зимой эта амплитуда становится больше и составляет в среднем 0,035–0,055 $\text{с/м}^{1/3}$. Наибольшие значения коэффициентов шероховатости на гидростворах отмечаются в моменты суточных провалов расходов и уровней воды, когда они достигают значений 0,07–0,08 $\text{с/м}^{1/3}$ и более.

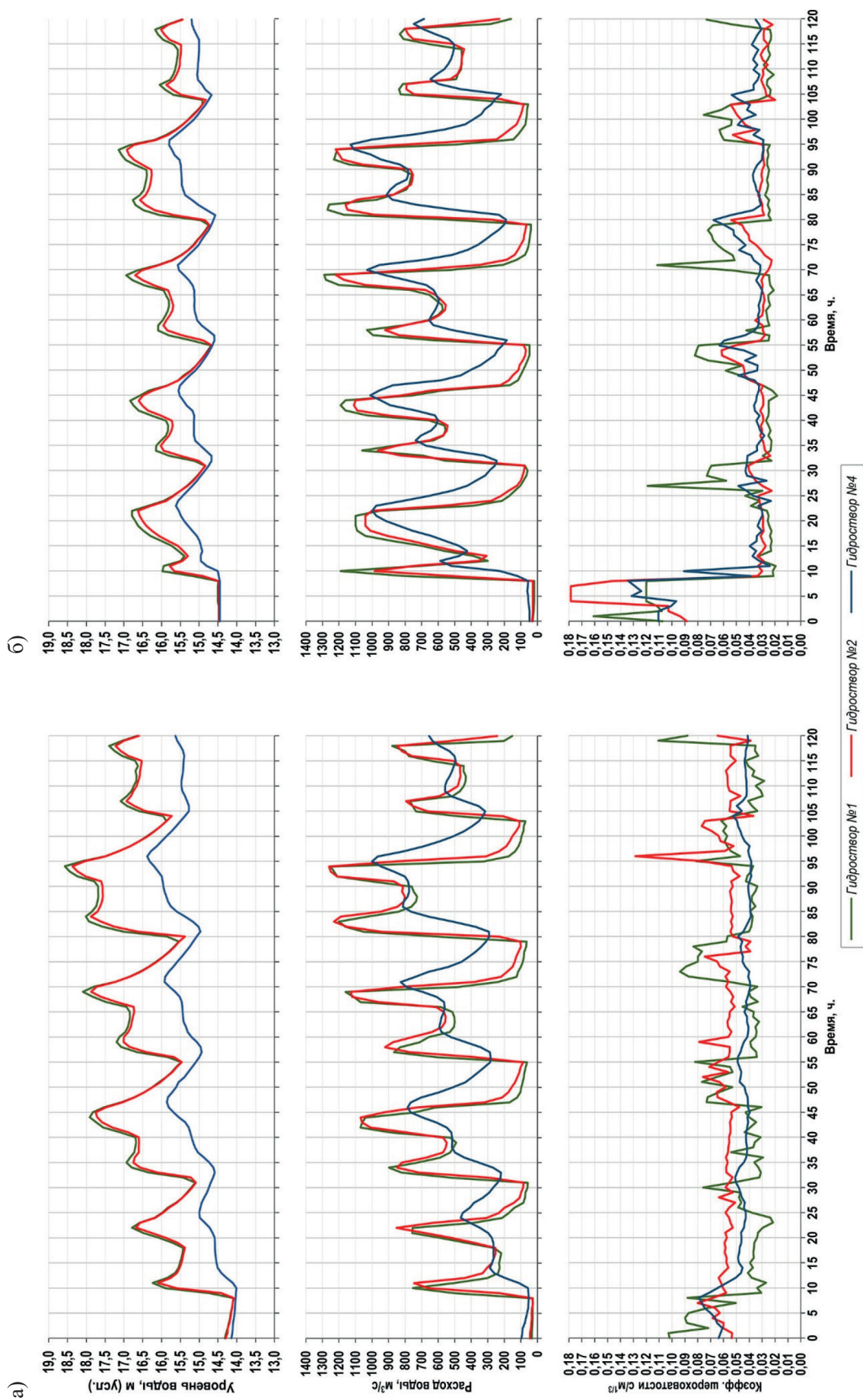


Рис. 1. Хронологические графики изменения отметок уровней воды, сбросных расходов и коэффициентов шероховатости русла на гидростворах № 1, 2 и 4 в зимний (а) и летний (б) периоды наблюдений

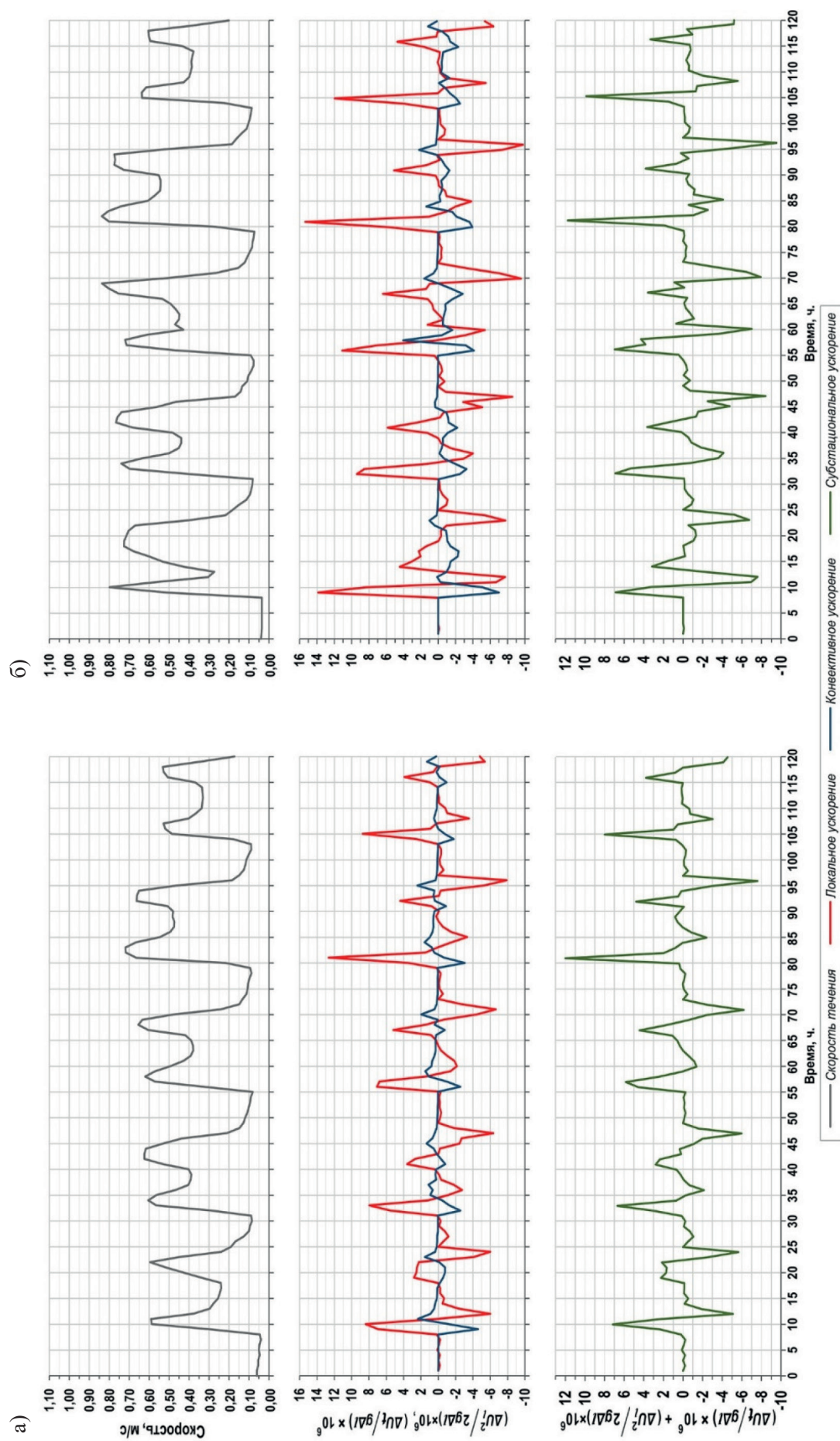


Рис. 2. Хронологические графики изменения скоростей течения воды, конвективных $\Delta U_t^2 / 2g\Delta t$, локальных $\Delta U_t / g\Delta t$ и субстанциональных $(\Delta U_t^2 / 2g\Delta t + \Delta U_t / g\Delta t)$ ускорений на гидропосте № 2 в зимний (а) и летний (б) периоды наблюдений

В данной работе выполнена оценка величины конвективного и локального ускорений в уравнении движения воды (1) и определен их вклад в общую величину потерь энергии по длине (рис. 2). На рисунке приведен хронологический график изменения скорости течения воды в створе поста № 2, а также графики изменения конвективных $\Delta U_i^2/2g\Delta l$, локальных $\Delta U_i/g\Delta l$ и субстанциональных ($\Delta U_i^2/2g\Delta l + \Delta U_i/g\Delta l$) ускорений на гидростворе № 2 в зимний и летний периоды наблюдений. Полученные результаты показывают, что положительные значения локальных ускорений на хронологическом графике имеют ряд характерных экстремумов, отвечающих начальному моменту прохождения волны попуска в створе гидрологического поста, а отрицательные максимумы, соответственно, заключительному моменту ее прохождения.

В зимний период наблюдений максимальное значение положительного локального ускорения получилось равным $12,7 \cdot 10^{-6}$, что составляет примерно 8 % от величины уклона свободной поверхности в момент наблюдений на гидростворе № 2. Значение отрицательного локального ускорения равно $-7,9 \cdot 10^{-6}$, что в 1,6 раза меньше положительного ускорения и составляет около 13 % от величины уклона свободной поверхности.

В летний период локальные ускорения становятся больше, чем летом в среднем на 20–25 %. Максимальное значение положительного локального ускорения получилось равным $15,3 \cdot 10^{-6}$, что составляет примерно 19 % от величины уклона свободной поверхности в момент наблюдений на гидростворе № 2. Отрицательное локальное ускорение составило $-9,79 \cdot 10^{-6}$, что примерно в 1,5 раза меньше положительного ускорения и сопоставимо по величине с уклоном свободной поверхности.

Максимальные положительные значения конвективных ускорений отвечают максимальным отрицательным значениям локальных ускорений и наоборот. По абсолютной величине конвективные ускорения оказались меньше, чем локальные, в среднем в 3–4 раза.

Хронологический график, иллюстрирующий изменение во времени суммы конвективных и локальных ускорений, показывает, что целом ход изменения величины субстанционального ускорения зимой и летом оказался достаточно близким, а сами значения максимальных ускорений мало различаются по величине. На графике отмечается ряд характерных временных периодов, в течение которых суммарная величина ускорений оказывается равной или близкой к нулевому значению. Такие временные промежутки соответствуют моментам суточного провала сбросных расходов воды и максимальным значениям пиковых расходов воды на гидростворе. Последняя связь оказалась менее отчетливой в связи с двухступенчатым характером режима суточного попуска расходов воды и обусловленной им перестройкой кинематической структуры речного потока.

Заключение (Conclusion)

Анализ материалов специальных натурных исследований, выполненных в нижнем бьефе Нижне-Свирского гидроузла в зимний и летний периоды времени, показал, что при прохождении волны суточного попуска воды происходят сложные процессы, связанные с трансформацией (распластыванием) волны попускового расхода по мере удаления от створа гидроузла. В ходе распространения волны попуска изменяются все гидравлические характеристики речного потока: отметки уровня воды, скорости течения воды и уклоны свободной поверхности.

Изменения характеристик речного потока в работе оценивались с помощью гидравлических параметров: значений числа Фруда, коэффициента Шези, коэффициента шероховатости речного русла, параметров транспорта наносов, а также значений локальных и конвективных ускорений. Полученные результаты иллюстрируют кинематику потока в нижнем бьефе гидроузла и характер изменения основных параметров потока в условиях неустановившегося движения воды подо льдом и в условиях открытого русла.

По мере удаления от створа гидроузла уменьшается амплитуда изменения величины попускового расхода воды и отметок уровней воды на гидростворах. В зимний период времени, при движении воды подо льдом, уменьшение амплитуды расходов воды происходит в большей степени, чем в период открытого русла. При этом анализ уровня режима в нижнем бьефе гидроузла показал

обратную картину — зимой амплитуда колебания уровней воды при прохождении волны попуска оказалась больше, чем летом.

Анализ полученных данных показал, что в зимний период наблюдений средние скорости течения и значения числа Фруда оказались меньше, чем летом при аналогичных расходах воды. Таким образом, процесс затухания попусковой волны в зимний период времени подо льдом происходит более интенсивно, чем летом. Отсюда следует ожидать, что в период открытого русла дальность распространения волны попуска будет больше, чем зимой.

Выполненная в работе оценка потерь энергии по длине речного потока свидетельствует о том, что в зимний период времени сопротивление движению воды, оцениваемое с помощью коэффициента шероховатости (по Маннингу), увеличивается на 40–50 % по сравнению с условиями движения воды при открытом русле. Минимальные значения коэффициента шероховатости отвечают пиковым расходам воды при прохождении волны попуска через гидроствор, а максимальные значения — суточным провалам расходов и уровней воды. В зимний период времени разброс значений коэффициента шероховатости между створами наблюдений оказался больше, чем летом. Оценка связи коэффициента Шези с уровнями воды, а также со скоростью течения воды на гидростворах показала низкую корреляцию.

Анализ значений локальных и конвективных ускорений позволил оценить характер и интенсивность их изменений при распространении волны попускового расхода воды в нижнем бьефе гидроузла. Установлено, что максимальные положительные значения локальных ускорений отмечаются в начальный момент прохождения волны попуска на гидростворе, а отрицательные значения приурочены к заключительному моменту. Последние примерно на 50 % меньше по величине, чем положительные ускорения. Летом локальные ускорения оказались больше, чем зимой, а также возрастает их вклад в общую величину потерь энергии по длине. По мере удаления от гидроузла абсолютные значения локальных ускорений будут уменьшаться. Относительная доля величины конвективных ускорений на гидростворе, расположенном вблизи створа гидроузла, оказалась меньше в три-четыре раза, чем локальные ускорения.

Результаты численных экспериментов по оценке параметров транспорта наносов, выполненных по данным почасовых наблюдений, показывают, что в условиях неустановившегося движения воды происходит увеличение расхода наносов в 2–3,5 раза по сравнению с аналогичными значениями, полученными по среднесуточным параметрам речного потока. Наибольшие расхождения между почасовыми и среднесуточными данными наблюдаются в створах, расположенных в непосредственной близости от гидроузла. Активизация транспорта наносов при прохождении волны попуска отмечается на всех гидростворах, как в летний период наблюдений — в условиях открытого русла, так и зимой, при движении воды подо льдом.

В зимний период интенсивность транспорта наносов становится меньше, чем летом. В непосредственной близости от створа гидроузла максимальная величина расхода наносов зимой оказалась в четыре раза меньше, чем в период открытого русла. В целом по длине реки, по мере удаления от створа гидроузла, интенсивность транспорта наносов снижается. При этом также сокращается разница между зимними и летними значениями расхода наносов.

Результаты, полученные в рамках настоящего исследования, позволяют улучшить практику гидравлических расчетов гидродинамических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов с целью повышения точности и надежности расчетного обоснования путевых мероприятий на судоходных реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.: Гидрометеоиздат, 1963. — 252 с.

2. 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.
3. Грушевский М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах / М. С. Грушевский. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 288 с.
4. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
5. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
6. 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.
7. Gladkov G. Hydromorphological substantiation of channel stability of navigable rivers in engineering water transport regulation of river runoff / G. Gladkov, M. Zhuravlev, V. Katolikov // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019: Volume 2. — Springer International Publishing, 2021. — Pp. 661–675. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_63.
8. 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.
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. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
13. Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел / Г. Л. Гладков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
14. Gladkov G. Sediment transport and water flow resistance in alluvial river channels: modified model of transport of non-uniform grain-size sediments / G. Gladkov, M. Habel, Z. Babiński, P. Belyakov // Water. — 2021. — Vol. 13. — Is. 15. — Pp. 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
15. 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.
16. Католиков В. М. Побочни в руслах рек: условия образования и их динамика / В. М. Католиков, З. Д. Копалиани // Водные ресурсы. — 2001. — Т. 28. — № 5. — С. 579–586.
17. Гладков Г. Л. Параметры транспорта наносов в реках с побочным типом руслового процесса / Г. Л. Гладков, В. М. Католиков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 493–507. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-493-507.
18. 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.
19. Беляков П. В. Анализ и оценка гидроморфологической ситуации на участке строительства мостового перехода через р. Зею в г. Благовещенске с помощью математического моделирования характеристик движения воды / П. В. Беляков, С. В. Конопацкий, П. С. Ржаковская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 862–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-862-874.
20. 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. — Pp. 141. DOI: 10.3390/w15010141.

21. 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.
22. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — М.: КРАСАНД, 2011. — Том 2. Морфодинамика речных русел. — 960 с.
23. 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.
24. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Сущенко. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
25. Sukhodolov A. N. Flow dynamics in alluvial channels: the legacy of Kirill V. Grishanin / A. N. Sukhodolov, V. I. Nikora, V. M. Katolikov // Journal of Hydraulic Research. — 2011. — Vol. 49. — Is. 3. — Pp. 285–292. DOI: 10.1080/00221686.2011.567760.
26. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». — 2017. — № 9 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).
27. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в гидравлических моделях горных рек и лотковых экспериментах» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». — 2017. — № 8 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

REFERENCES

1. Kondrat'eva, N. E., and V. A. Uryvaeva. *Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody na reke Sviri v zimnikh i letnikh usloviyakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1963.
2. 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.
3. Grushevskii, M. S. *Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekakh i kanalakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.
4. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
5. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
6. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Ekspperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.
7. Gladkov, Gennady, Michail Zhuravlev, and Viktor Katolikov. "Hydromorphological substantiation of channel stability of navigable rivers in engineering water transport regulation of river runoff." *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019: Volume 2*. Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_63.
8. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2022.
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. Alekseyuk. *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. Gladkov, Gennadii L., and Michail V. Zhuravlev. "Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

13. Gladkov, Gennadii L. "Studying the granular roughness of river channels bottom." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
14. Gladkov, Gennady, Michał Habel, Zygmunt Babiński, and Pakhom Belyakov. "Sediment transport and water flow resistance in alluvial river channels: modified model of transport of non-uniform grain-size sediments." *Water* 13.15 (2021): 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
15. 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.
16. Katolikov, V. M., and Z. D. Kopalani. "Pobochni v ruslakh rek: usloviya obrazovaniya i ikh dinamika." *Vodnye resursy* 28.5 (2001): 579–586.
17. Gladkov, Gennadii L., Viktor M. Katolikov, and Pachom V. Belyakov. "Parameters of sediments transport in rivers with a side type of the channel process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 493–507. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-493-507.
18. Babiński, Zygmunt, and Michał 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.
19. Belyakov, Pachom V., Sergei V. Konopatsky, and Polina S. Rzhakovskaya. "Analysis and assessment of the hydromorphological situation at the construction site of a bridge crossing over the Zeya river in Blagoveshchensk using mathematical modeling of water movement characteristics." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 862–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-862-874.
20. 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.
21. 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.
22. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND, 2011.
23. Chalov, R. S., and S. R. Chalov. "Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding." *Water Resources* 47.3 (2020): 374–386.
24. Kondrat'ev, N. E., I. V. Popov, and B. F. Snishchenko. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.
25. Sukhodolov, Alexander N., Vladimir I. Nikora, and Viktor M. Katolikov. "Flow dynamics in alluvial channels: the legacy of Kirill V. Grishanin." *Journal of Hydraulic Research* 49.3 (2011): 285–292. DOI: 10.1080/00221686.2011.567760.
26. Kopalani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. "Dannye izmerenii gidravlicheskih kharakteristik transporta donnykh nanosov v bol'shikh, malykh i srednikh ravninnykh rekakh." *Ofitsial'nyi byulleten' «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem»* 9 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM>.
27. Kopalani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. "Dannye izmerenii gidravlicheskih kharakteristik transporta donnykh nanosov v gidravlicheskih modelyakh gornykh rek i lotkovykh eksperi-mentakh." *Ofitsial'nyi byulleten' «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem»* 8 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM>.

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

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

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

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@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.

Received: April 10, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-359-373

ANALYSIS OF THE EXISTING REGULATIONS ON CERTIFICATION AND TRAINING OF AUTONOMOUS VESSELS OPERATORS

A. A. Lentarev

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

The development of autonomous navigation has reached a stage where the issue of creating a system for training specialists in the field of autonomous ship management and developing a regulatory framework that defines the requirements for methodological, personnel and logistical support for such training arises. A brief analysis of the available bibliographic sources on the topic of training operators of autonomous vessels is presented. The requirements of the procedures for the training and certification of autonomous ships operators contained in three regulatory documents published to date such as Maritime Autonomous Surface Ships. Principles and Code of Practice of the British Marine Industry Association, Regulations for the Classification of Offshore Autonomous and Remotely Operated Surface Vessels of the Russian Maritime Register of Shipping and Norwegian Register Standard are considered. A list of basic competencies necessary for the management of autonomous vessels has been formed. A significant part of the knowledge, skills and abilities that make up these competencies are acquired at the stage of training under programs for obtaining a professional seafarer diploma at the management level. The competencies of the autonomous vessel operator are formed on the basis of maritime competencies by adding additional knowledge, skills and abilities that reflect the specifics of the serviced autonomous vessels, equipment and apparatus used in a particular remote control center and navigation conditions in the serviced area. Additional competencies of the operator are largely related to other specialties (IT specialists, electromechanics, radio specialists). In the future, within the framework of the international regulation carried out by the IMO, in the training of autonomous ships operators, the approach underlying the training of ship traffic control systems operators can be used.

Keywords: autonomous ship, operator, training, certification, training, regulatory document.

For citation:

Lentarev, Alexander A. "Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 359–373. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-359-373.

УДК 629.12

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОЛОЖЕНИЙ О СЕРТИФИКАЦИИ И ПОДГОТОВКЕ ОПЕРАТОРОВ АВТОНОМНЫХ СУДОВ

А. А. Лентарёв

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

В работе показано, что развитие автономного судовождения достигло такой степени, когда актуальным является вопрос создания системы подготовки специалистов в области управления автономными судами и разработки нормативной базы, определяющей требования к методическому, кадровому и материально-техническому обеспечению данной подготовки. Представлен краткий анализ доступных библиографических источников по тематике подготовки операторов автономных судов. Рассмотрены требования к процедурам подготовки и сертификации операторов автономных судов, содержащихся в трех изданных к настоящему времени нормативных документах: Maritime Autonomous Surface Ships. Principles and Code of Practice британской Ассоциации морской индустрии; Положении по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов Российского морского регистра судоходства; Стандарте Норвежского судового регистра. Выполнен сравнительный анализ систем сертификации и компетенций, необходимых для подготовки операторов автономных судов, представленных в указанных документах. На основе этих документов выделены шесть критериев сертификации оператора автономного судна: уровень квалификации, стаж работы на море, дополнительное теоретическое обучение, практическая подготовка, тренажерная подготовка, дополнительные национальные требования. Сформирован перечень

основных компетенций, необходимых для управления автономными судами. Отмечается, что значительная часть знаний, умений и навыков, составляющих эти компетенции, приобретается на этапе подготовки по программам, предусматривающим получение профессионального диплома моряка уровня управления. Обращается внимание на то, что компетенции оператора автономного судна формируются на основе морских компетенций путем получения дополнительных знаний, умений и навыков, отражающих специфику обслуживаемых автономных судов, оборудования и аппаратуры, используемой в конкретном центре дистанционного управления и условий судоходства в обслуживаемой зоне. Дополнительные компетенции оператора во многом относятся к таким специальностям, как IT-специалисты, электромеханики, радиоспециалисты. В дальнейшем в рамках международной регламентации, проводимой ИМО, при подготовке операторов автономных судов может быть использован подход, заложенный в основу подготовки операторов систем управления движением судов.

Ключевые слова: автономное судно, оператор, подготовка, сертификация, подготовка, нормативный документ.

Для цитирования:

Лентарёв А. А. Анализ существующих положений о сертификации и подготовке операторов автономных судов / А. А. Лентарёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 359–373. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-359-373.

Введение (Introduction)

Изучение проблемы автономного судовождения находится в рамках концепции судоходства 4.0, которая, в свою очередь, является результатом четвертой промышленной революции (индустрия 4.0), осуществляемой на базе киберфизических систем (КФС), разрабатываемых с использованием таких передовых технологий, как искусственный интеллект (ИИ), интернет вещей (IoT) и облачные вычисления [1], [2]. Развитие технологий судоходства 4.0 предъявляет новые требования ко всем составляющим морской отрасли, включая подготовку моряков. Судоходство 4.0 оказывает влияние на дизайн, проектирование, постройку и эксплуатацию морских судов, включая формирование экипажей судов, и является логическим продолжением концепции e-Судоходства, сформированной на исходе 2010-х гг. [3].

К настоящему времени в некоторых странах, включая Великобританию, Норвегию, Финляндию, Японию, Южную Корею, Россию, реализовано несколько десятков проектов в области автономного судоходства, обзор которых представлен, например, в работе [4]. Наряду с вопросами техники и технологии автономного судоходства в последние годы появились публикации, посвященные проблеме подготовки специалистов в этой области и, в частности, операторов морских автономных надводных судов (МАНС). Так, Агентство морской и береговой охраны Великобритании (МСА) констатирует, что Англия станет лидером в области подготовки специалистов по управлению автономными судами. Для достижения этой цели МСА выступило инициатором создания в 2021 г. Международной рабочей группы по стандартам подготовки таких специалистов (MASSpeople), в работе которой принимают участие представители девяти европейских государств и морских международных организаций [5]. В конце 2022 г. состоялся первый выпуск специалистов компании Fugro по сертифицированной программе обучения управлению МАНС в Национальном центре передового опыта в области морской робототехники, базирующемся в Саутгемптоне [6]. Австралийский морской колледж в течение нескольких последних лет проводит обучение представителей Королевских ВМС страны по программе управления морскими автономными системами, предназначенными для использования на надводных маломерных и подводных судах. В 2023 г. в нем открыт набор на еще одну программу подготовки операторов (помощников капитанов) МАНС [7].

В России, по информации рабочей группы МАРИНЕТ, в декабре 2021 г. компанией «Мор-спецсервис» подписано соглашение с Морским государственным университетом имени адмирала Г. И. Невельского и Сахалинским государственным университетом о подготовке специалистов по автономной навигации [8]. В Северном Арктическом федеральном университете планируется подготовка операторов МАНС на тренажере компании Sitronics KT, презентация работы которого состоялась в августе 2021 г. [9], однако вопросы практической реализации программ подготовки операторов МАНС пока не рассматриваются.

При разработке программ подготовки операторов МАНС ключевой вопрос связан с набором компетенций, которыми должен обладать специалист, который обеспечивает эксплуатацию МАНС, находясь в центре дистанционного управления (ЦДУ). До настоящего времени в подготовке операторов МАНС сформировалось два подхода. Первый подход основан на прохождении специальной подготовки на корпоративном уровне с учетом особенностей организационного, технического и технологического обеспечения конкретных проектов. При втором подходе учебные программы направлены на подготовку операторов МАНС в целом, без жесткой привязки к отдельным проектам, как, например, указанная ранее программа подготовки операторов (вахтенных помощников) МАНС в австралийском морском колледже. В любом случае структура и содержание программы подготовки определяются компетенциями, необходимыми для управления автономными судами.

Первое большое исследование, посвященное проблеме содержания подготовки специалистов по управлению автономными судами, было выполнено в 2019 г. под эгидой Всемирной ассоциации морских университетов (ВАМУ) учеными из австралийского морского колледжа, Университета Юго-Восточной Норвегии и германского Джейдского университета [10]. На основе выполненного авторами данного проекта библиографического анализа было установлено, что лишь 15 (семь статей, семь докладов на конференциях и одна магистерская диссертация), в той или иной степени, касаются темы исследования.

На основе анализа полученного материала выделены две основные проблемы в области подготовки специалистов по управлению автономными судами: неготовность морской образовательной инфраструктуры; неопределенность в содержании подготовки. По обеим этим проблемам сформулированы конкретные доказательства их существования, которые, в принципе, определяют возможные пути их решения [10]. За три года, прошедших после публикации отчета ВАМУ, по данной теме было опубликовано несколько десятков работ (статьи в журналах и средствах массовой информации, доклады на конференциях, диссертации). Краткий библиографический обзор некоторых публикаций представлен в работе [11]. Так, в работе [12] сформулированы необходимые для управления автономными судами 33 компетенции, распределенные по четырем категориям: технические, социальные, методологические и персональные. Различные варианты набора компетенций рассмотрены в работах [13]–[16]. Группа японских ученых в работе [17] предложила модель идентификации компетенций оператора автономного судна, основанную на *методе анализа недостатков и целевом методе*. Модель была апробирована с использованием полнофункционального навигационного тренажера. Проблеме разработки тренажера для подготовки операторов автономных судов посвящена работа корейских специалистов [18]. Анализ компетенций судоводителя, представленных в модельном курсе ИМО 7.03 применительно к функциям оператора автономного судна, выполнен в работе [19]. Различные аспекты проблемы подготовки морских образовательных учреждений к обучению операторов автономных судов рассмотрены в работах [20], [21].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Развитие автономного судовождения достигло такого уровня, когда приобретает актуальность проблема нормативного регулирования процесса подготовки и сертификации специалистов, обеспечивающих эксплуатацию автономных судов. К настоящему времени существует три нормативных документа, посвященных этой проблеме: Кодекс SMI, Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) и Стандарт DNV. Впервые стандарты подготовки операторов МАНС в систематизированном виде были разработаны в 2016 г. в рамках ассоциации SMI (Society of Maritime Industries), представляющей авторитетное сообщество предприятий, организаций и специалистов, занятых в области морской инженерии, технологий и науки. В 2019 г. SMI опубликовала третью версию документа *Maritime Autonomous Surface Ships. Principles and Code of Practice* (далее — Кодекс SMI), в разработке которого приняли участие более пятидесяти международных и ведущих английских организаций [22].

В России вопросы квалификации и подготовки операторов МАНС в общем виде представлены в официальном документе «Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)». НД № 2–030101–037» (далее — Положения РМРС), разработанном Российским морским регистром судоходства (РМРС) и вступившем в силу 1 августа 2020 г. [23]. Третьим по хронологии регламентирующим документом в области подготовки и сертификации операторов автономных судов является Стандарт Норвежского судового регистра, состоящий из двух частей: схемы сертификации операторов центров дистанционного управления (Certification Scheme for Remote Control Centre Operators, DNV-RP-0323) (август 2021 г.) и компетенции операторов центра дистанционного управления (Competence of Remote Control Centre, DNV-ST-0324 (октябрь 2022 г.) [24], [25]. Далее этот «сдвоенный» документ называется Стандарт DNV.

Цель данной работы заключается в исследовании нормативных требований в области подготовки и сертификации операторов автономных судов. Для этого реализованы две задачи: сравнительный анализ требований и рекомендаций Кодекса SMI, Положений РМРС и Стандарта DNV и сопоставление этих требований и рекомендаций с предложениями, содержащимися в библиографических источниках. Следует отметить, что здесь и далее под термином «автономные суда (или МАНС)» понимаются суда, соответствующие определению РМРС [23].

После внесения в 1995 г. поправок в «Международную конвенцию о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года» был принят Кодекс по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты (Кодекс ПДНВ) [26], ключевыми понятиями которого являются «компетентность» и «компетенция». Несмотря на то, что в Конвенции ПДНВ определения этих терминов отсутствуют, но их суть подробно изложена, например, в модельном курсе ИМО 3.12, в котором понятие «профессиональной компетентности» сформулировано как «...способность выполнять работу в соответствии с предписанными стандартами в рамках определенных условий и таким образом, чтобы соответствовать изменяющимся требованиям». Соответственно компетенция — это совокупность знаний, умений и навыков, необходимых для выполнения конкретной работы в соответствии с заданными критериями и условиями [27]. Именно в такой интерпретации далее используются термины «компетентность» и «компетенция» при анализе содержания документов, регламентирующих подготовку и сертификацию операторов автономных судов.

В Кодексе SMI рассмотрены все вопросы эксплуатации МАНС, начиная от общих принципов и заканчивая экологическими аспектами. Стандарты подготовки, квалификации, компетентности и несения вахты операторов автономных судов, представленные в гл. 12, разработаны на основе следующих основных принципов [22]:

- при подготовке операторов должны соблюдаться все требования руководящих документов ИМО, включая международные конвенции МППСС-72, СОЛАС-74, ПДНВ, МАРПОЛ-73/78;
- уровни квалификации и компетенций операторов должны быть определены в Плане безопасной эксплуатации, идентичном установленному Резолюцией ИМО А.1047(27) «Принципы минимального безопасного состава экипажа судна»;
- при формировании необходимых навыков операторов должны учитываться класс и размер МАНС, район его эксплуатации и характер груза;
- операторы должны быть обучены и сертифицированы в соответствии с признанными властями государства флага стандартами на уровне, который, по крайней мере, эквивалентен уровню подготовки членов экипажа обычного судна.

В качестве обязательного требования к оператору МАНС в Кодексе SMI зафиксирована необходимость наличия действующего квалификационного аттестата моряка. В зависимости от водоизмещения судна и района плавания это может быть как профессиональный диплом уровня управления по Конвенции ПДНВ 1978 г. с поправками, так и, например, сертификат RYA (Royal Yachting Association), если его обладатель хочет стать оператором автономной моторной лодки или катера соответствующего уровня.

Подготовка операторов МАНС должна проводиться по одобренным программам, соответствующим классу судна и его району плавания, с обязательным документированием места и времени

обучения. Примерная структура и содержание программы подготовки оператора МАНС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Структура подготовки операторов МАНС по Кодексу SMI

Модули программы подготовки	Знание, понимание и профессиональные навыки
Принципы автономных систем	Понимание уровней автоматизации и уровней взаимодействия оператора и МАНС
Правила эксплуатации	Способность разрабатывать правила (разрешения, уведомления, требования), необходимые для эксплуатации МАНС в конкретной области
Принципы безопасности, включая автоматическое применение правил	Понимание принципов безопасной эксплуатации МАНС и ограничений в реализации требований нормативных актов
Управление, связь и безопасность	Способность управлять и использовать системы связи с МАНС, действовать при потере связи, понимание всех аспектов безопасности, включая кибербезопасность
Подготовка судна к эксплуатации	Способность подготовить судно к эксплуатации, включая спуск на воду с берега или другого судна
Ответственность	Понимание ответственности всех сторон, связанных с эксплуатацией МАНС (судовладелец, оператор, страховое общество, сертифицирующий орган)
Оценка риска	Способность выполнить оценку риска всех операций МАНС
Спецификация судна	Способность управлять конкретным МАНС и понимание всех операционных требований к эксплуатации МАНС
Система техобслуживания и проверки	Способность обслуживания, налаживания, технического осмотра, включая поиск неисправностей, предпусковых проверок и ремонта всех компонентов общей системы
Средства управления и интерфейсы оператора	Понимание принципов работы всех судовых регуляторов и интерфейсов оператора и особенностей дистанционного управления судами
Эксплуатационные ограничения	Понимание пределов возможной эксплуатации судна
Морская практика	Знание эксплуатационных характеристик МАНС в различных условиях и при любых ограничениях
Эксплуатация судна	Способность управления всеми системными операциями судна, бесперебойное обеспечение безопасности и соблюдение всех требований регламентирующих документов
Чрезвычайные ситуации, непредвиденные обстоятельства и неисправности	Способность управлять судном или предпринимать соответствующие действия в случае чрезвычайных ситуаций, включая потерю связи с МАНС
Планирование	Способность планировать работу МАНС в соответствии с классом и районом плавания судна и его особенностями

Кодексом SMI рекомендовано, чтобы для всех предполагаемых операций МАНС с учетом знаний и подготовки оператора была выполнена процедура оценки и анализа риска, в частности, с использованием метода HAZOP (Hazard and Operability Analysis). Для этого все операции МАНС разбиваются на отдельные модули. Затем каждый модуль оценивается с точки зрения потенциальных опасностей и проблем, которые должны выявлять знания, умения и навыки операторов, необходимые для выполнения данных операций. По сути, эта процедура соответствует формализованной оценке безопасности, выполнение которой регламентировано циркуляром ИМО MSC–MEPC.2 /Circ.12 / Rev.2) 2018 г. [28]. Предлагаемая процедура определения необходимого уровня подготовки оператора МАНС приведена на рис. 1. В этой процедуре используется такой критерий риска, как ALARP (As Low As Reasonably Practicable). Для того чтобы гарантировать рассмотрение всех аспектов операций МАНС, проверку HAZOP должна выполнять многопрофильная группа специалистов.

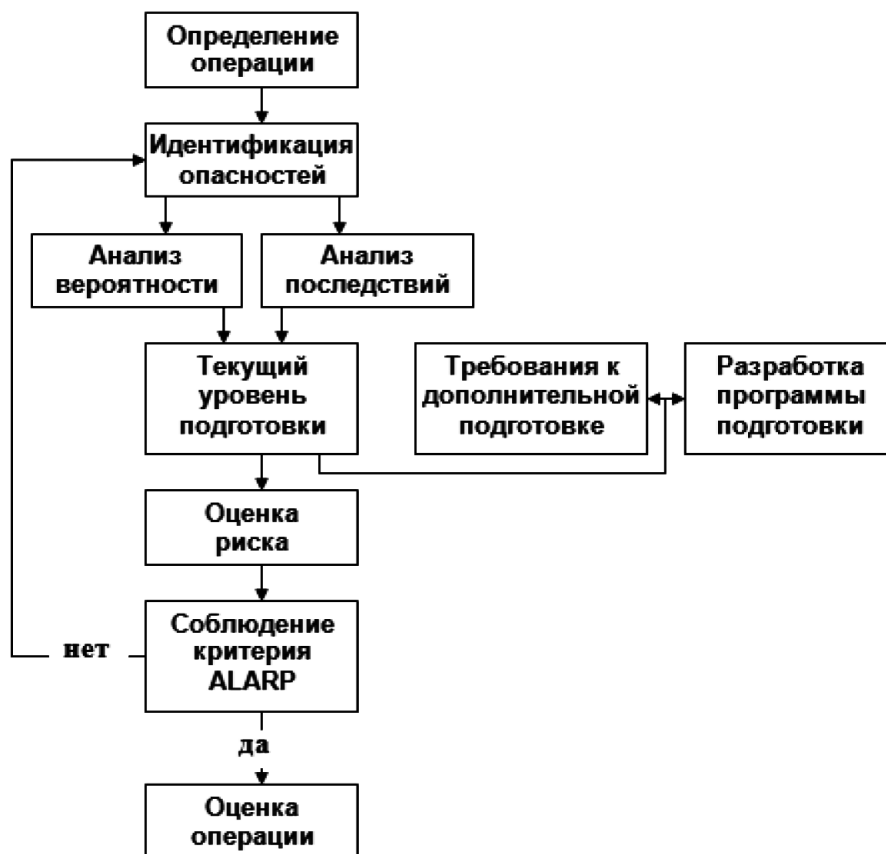


Рис. 1. Процедура определения уровня подготовки оператора МАНС

Кодексом SMI установлено, что должны быть разработаны и поддерживаться официальные документы, подтверждающие уровень подготовки операторов. В этих документах должна фиксироваться такая информация, как текущий опыт оператора (время, место и сроки работы, описание МАНС, программное обеспечение, выполняемые операции и т. п.), результаты оценки компетентности, доказательства непрерывного профессионального развития и специальной подготовки. В Кодексе приводятся рекомендуемые формы таких документов.

Иной подход к определению необходимых компетенций представлен в «Положениях РМРС». В этом документе устанавливается, что в штатном расписании командного состава ЦДУ должны быть предусмотрены как минимум следующие должности:

- капитан (аналогично капитану судна с экипажем);
- оператор (вахтенный офицер), не ниже старшего помощника капитана — квалификация «уровень управления»;
- инженер-механик (аналогично старшему механику (электромеханику) — квалификация «уровень управления»;
- оператор (вахтенный механик), не ниже второго механика — квалификация «уровень управления»;
- инженер по связи (аналогично радиоэлектронику — квалификация «уровень управления») [23].

Все члены командного состава ЦДУ должны иметь действующий рабочий диплом соответствующей квалификации, полученной на базе высшего морского образования. К капитану и операторам (вахтенным офицерам) предъявляются следующие дополнительные требования:

- стажировка в лоцманской службе для всех зон, в которых для данного ЦДУ возможно дистанционное управление навигацией, наличие действующего свидетельства о прохождении такой стажировки, а также наличие действующего лоцманского удостоверения, выданного капитаном порта и подтверждающего квалификацию морского лоцмана, его право на осуществление лоц-

манской проводки судов в районах, в которых возможно дистанционное управление навигацией для данного ЦДУ;

- тренажерная подготовка по дистанционному управлению МАНС в зоне действия данного ЦДУ для всех типов судов, которыми может управлять данный ЦДУ, а также наличие действующего свидетельства о прохождении такой подготовки в работающем ЦДУ или на тренажере;

- тренажерная подготовка по управлению МАНС для всех типов судов, которыми может управлять данный ЦДУ, а также наличие действующего свидетельства о прохождении такой подготовки в работающем ЦДУ или на тренажере.

Капитан и операторы должны иметь стаж плавания не менее 24 мес. в должности капитана, старшего помощника или вахтенного помощника морского судна валовой вместимостью более 500 т. Следует отметить, что в положениях РМРС (компетенциях капитана и оператора) перечислены области знаний без указания следующих необходимых профессиональных навыков, которыми должны обладать операторы:

- географические, навигационные, метеорологические и гидрологические особенности обслуживаемой зоны и основные характеристики судопотоков;

- особенности работы морских портов и терминалов, служб портового контроля, лоцманского и буксирного обеспечения;

- средства навигационного оборудования, расположение и характеристики причалов, районов и мест якорной стоянки, мест высадки и приема лоцмана, расположение навигационных опасностей;

- задачи и функции ЦДУ, нормативное обеспечение его работы, технические и эксплуатационные характеристики, возможности и ограничения технических средств ЦУД, методы и правила их использования операторами;

- методы и правила переключения режимов контроля судов: мониторинг, поддержка принятия решения, дистанционное и автономное управление.

Таким образом, установленные Положениями РМРС требования сводятся к тому, что оператор автономного судна должен, по сути, обладать квалификацией лоцмана и дополнительной компетенцией, приобретаемой в результате тренажерной подготовки по управлению и дистанционному управлению МАНС. Отдельной специальной программы подготовки для оператора МАНС не предусматривается.

Наиболее полно, по сравнению с Кодексом SMI и Положениями РМРС, все вопросы подготовки и сертификации оператора автономного судна отражены в Стандарте DNV [24], [25]. *Первая часть* этого стандарта — DNV-RP-0323 — посвящена сертификации операторов ЦДУ. С учетом международного характера морского судоходства установлено, что процедура сертификации оператора должна проходить на английском языке. Кандидат на получение сертификата оператора должен отвечать следующим требованиям:

- наличие действующего профессионального диплома в соответствии с Конвенцией ПДНВ;

- минимум два года (из последних 5 лет) стажа работы в должности, соответствующей его профессиональному диплому;

- успешное прохождение объективной оценки компетентности в признанном экзаменационном центре;

- соответствие дополнительным требованиям национальной морской администрации, если такие имеются [24].

Схема сертификации оператора состоит из трех этапов:

1-й этап — обучение по 40-часовой программе начальной подготовки в признанном учебном центре;

2-й этап — стажировка продолжительностью не менее 270 ч в действующем ЦДУ (часть стажировки может быть пройдена в признанном тренажерном центре);

3-й этап — оценка компетентности в признанном экзаменационном центре.

Общая схема сертификации приведена на рис. 2 [24]. В Стандарте DNV установлены также требования к экзаменационным центрам, тренажерам, инструкторам и экзаменаторам.

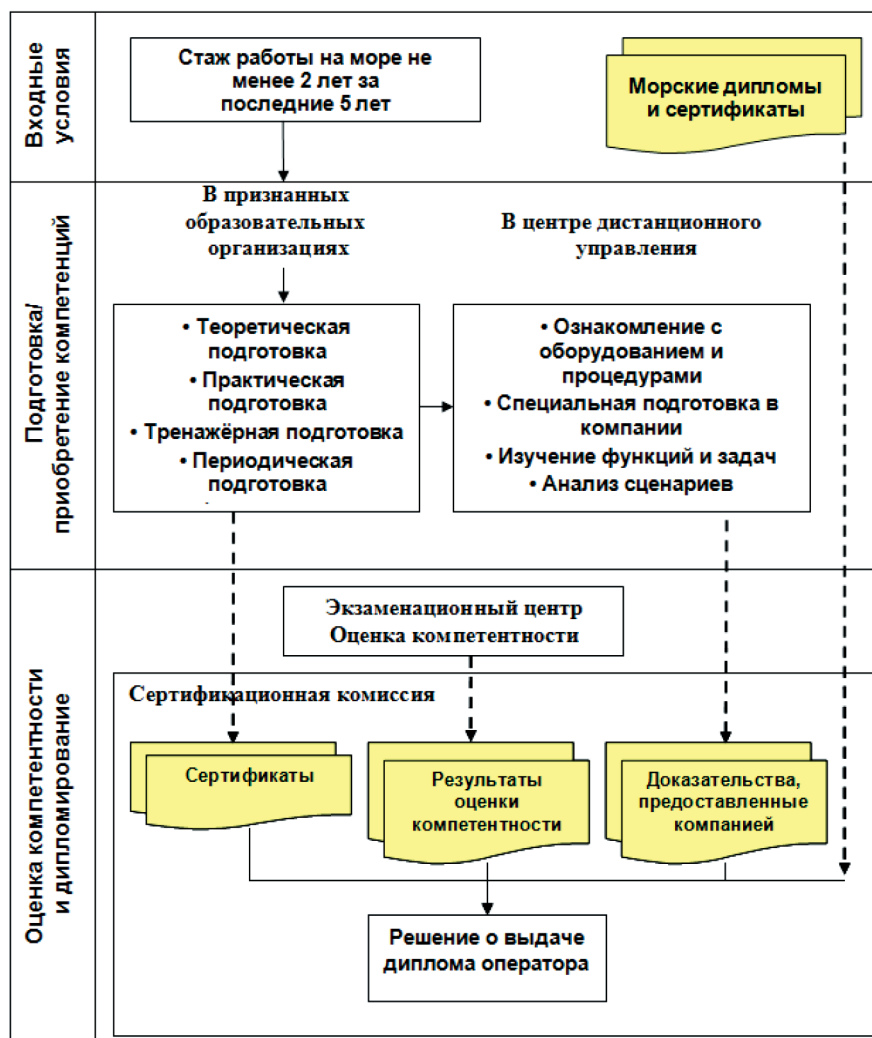


Рис. 2. Схема сертификации оператора Центра дистанционного управления автономными судами по Стандарту DNV

Во второй части Стандарта DNV представлены все компетенции, необходимые для выполнения функций оператора автономного судна (в стандарте используются термины автономное судно, дистанционно управляемое судно и судно с дистанционной поддержкой). Стандарт, так же, как и Конвенция ПДНВ, основан на компетентностном подходе с небольшими терминологическими изменениями. Так, в стандарте под компетентностью имеется в виду «*способность применять знания, умения и навыки таким образом, чтобы достигать конкретных результатов*» [25]. Причем эти результаты должны быть заранее прописаны с точки зрения критериев и условий их достижения. Как видно, это определение, в принципе, соответствует приведенному ранее определению термина «профессиональная компетентность», принятому в модельном курсе 3.12 ИМО. Следовательно, и в Стандарте DNV, и в Конвенции ПДНВ компетенция означает *совокупность знаний, умений и навыков, необходимых для достижения конкретных результатов (для выполнения конкретной работы)*. Отдельные знания, умения или навыки, формирующие состав компетенции, следует рассматривать как ее элементы. Элемент компетенции соответствует действию, с помощью которого претендент на диплом оператора может доказать, что он приобрел ту часть компетенции, которая определяется этим элементом. В стандарте каждая компетенция или ее элемент относится к одному из четырех уровней познания, представленных в табл. 2. (Следует отметить, что в Конвенции ПДНВ используется несколько иная таксономия познания, представленная, например, в модельном курсе ИМО 3.12).

Таблица 2

Определение различных уровней познания

Номер уровня	Уровень познания	Описание
1	Знания (К)	Запоминание или воспроизведение соответствующей, ранее изученной информации
2	Понимание (U)	Придание смысла новым ситуациям и / или новому материалу, вспоминая и используя необходимую информацию с целью свидетельствования о понимании определенных действий
3	Применение (A)	Использование ранее полученной информации в новых конкретных ситуациях для решения задачи единственным или лучшим способом
4	Интегрирование (I)	Разделение информации на составные части и изучение такой информации для выработки различных решений с помощью определения мотивов или причин, формулирования выводов и / или нахождения доказательств в поддержку обобщений; творческого применения ранее полученных знаний и умений для создания новой или оригинальной сущности; оценки материала на основе личных ценностей или мнений для получения конечного продукта с заданными однозначными характеристиками

Вербальное представление каждого элемента компетенции начинается с поведенческого действия, результаты которого можно однозначно идентифицировать. (В Стандарте DNV-ST-0324 приведен перечень рекомендуемых поведенческих глаголов для каждого уровня познания, приведенного в табл. 2). В начале каждого элемента компетенции следует добавлять следующую преамбулу: «Оператор ЦДУ должен быть способен...», которая при описании компетенций опускается. Например, в табл. 3.2 Стандарта DNV-ST-0324 под идентификационным номером 1.2.22 приведен такой элемент компетенции, как Calibrate Sensors used as Input to Situational Awareness, который относится к уровню познания А. Это означает, что оператор ЦДУ должен быть способен выполнить калибровку датчиков, предоставляющих входную информацию для ситуационной осведомленности на уровне познания «применение».

В Стандарте DNV все компетенции оператора, необходимые для мониторинга и управления МАНС, разделены на пять категорий, состоящих из общих и дополнительных компетенций по четырем направлениям: судовождение, судовой двигатель и судовые системы, связь, грузовые и балластные операции.

Общие компетенции сгруппированы в восемь разделов: функции дистанционного управления; центр дистанционного управления; человеческое восприятие и взаимодействие, в том числе человеко-машинное взаимодействие; передача данных; безопасность и защита окружающей среды; управление в аварийных ситуациях; законодательство и контракты; документация и записи. Каждый раздел компетенций, в свою очередь, представлен в виде отдельных компетенций. Например, наиболее полный раздел, посвященный управлению в аварийных ситуациях, включает следующие компетенции:

- общие принципы аварийного управления;
- ухудшение или потеря связи между ЦДУ и МАНС;
- поступление воды внутрь судна;
- пожар на автономных и дистанционно управляемых судах;
- потеря контроля над автономным или дистанционно управляемым судном;
- аварийная буксировка;
- аварийная постановка на якорь;
- столкновения и посадки на мель;
- помощь в проведении аварийно-спасательных работ на море;
- кибербезопасность.

Дополнительные компетенции, сгруппированные по четырем направлениям, включают следующее:

- *судовождение*: общие вопросы управления судами, запуск и проверка состояния судовых систем, учет погоды и окружающих условий, плавание в составе потока судов, планирование рейса, подготовка судна к выходу в рейс, выполнение швартовных операций, управление судном, навигация автономных и дистанционно управляемых судов, избегание ситуации столкновения;
- *судовой двигатель и судовые системы*: общий надзор за машинными системами, контроль и мониторинг зарядки аккумуляторов, техобслуживание и ремонт;
- *связь*: общие вопросы связи на море, связь автономных и дистанционно управляемых судов;
- *грузовые и балластные операции*: планирование грузовых операций, дифферент, остойчивость и прочность, взаимодействие с береговыми службами по вопросам перевозки грузов на автономных и дистанционно управляемых судах, сепарация грузов, планирование передачи грузов, грузовые операции, контроль груза на переходе, планирование и выполнение балластных операций, дебалластные операции, управление балластными водами.

Перечень представленных в Стандарте DNV компетенций может быть использован для разработки программ подготовки операторов. Однако при этом следует учитывать то обстоятельство, что часть этих компетенций совпадает с компетенциями, представленными в табл. А-II/1 и А-II/2 Кодекса ПДНВ, определяющими минимальный уровень подготовки вахтенных помощников, старших помощников и капитанов. Поэтому претендент на получение сертификата оператора, имея действующий профессиональный диплом уровня управления, уже владеет частью необходимых для оператора компетенций.

Результаты (Results)

Основные результаты данной работы представлены в табл. 3 и 4. В табл. 3 приведены критерии сертификации оператора автономного судна, установленные в трех рассмотренных нормативных документах: Стандарт DNV, Кодекс SMI и Положения РМРС. Такие критерии сертификации как «уровень квалификации» и «стаж работы на море» являются, по сути, базовыми требованиями, которые учитываются при отборе кандидатов на обучение по программе подготовки оператора. Термин «признанный» означает, что соответствующий учебный или тренажерный центр имеет необходимые полномочия для выполнения своих функций, подтвержденные морской администрацией.

Таблица 3

Критерии сертификации оператора автономного судна

Критерии сертификации	Стандарт DNV	Кодекс SMI	Положения РМРС
Уровень квалификации	Профессиональный диплом уровня управления в соответствии с Конвенцией ПДНВ	Аттестат моряка в зависимости от водоизмещения и района плавания автономного судна	Профессиональный диплом уровня управления в соответствии с Конвенцией ПДНВ, сертификат лоцмана
Стаж работы на море	24 мес. (в течение последних 5 лет)	Не определен	24 мес.
Дополнительное теоретическое обучение	Предусмотрено (программа 40 ч)	Предусмотрено (срок обучения зависит от водоизмещения и района плавания автономного судна)	Не предусмотрено
Практическая подготовка (стажировка)	В признанном учебном центре и в ЦДУ	Не определено	В лоцманской службе и в ЦДУ
Тренажерная подготовка	В признанном тренажерном центре	Не определено	В признанном тренажерном центре
Дополнительные национальные требования	Предусмотрено	Не определено	Не определено

В табл. 4 приведена информация о наличии основных компетенций оператора автономного судна в трех рассмотренных нормативных документах.

Таблица 4

Основные компетенции оператора автономного судна

Компетенция	Стандарт DNV	Кодекс SMI	Положения РМРС	Библиографические источники
Электронная и компьютерная инженерия	++	+	+	[10], [12], [13]
Автоматическое управление и автономные системы	++	++	++	[10], [12], [13], [16]
Дистанционное управление	++	++	++	[13], [16]
Искусственный интеллект и машинное обучение	+	+	++	[10], [12], [13], [16]
Диагностика неисправностей	++	++	–	[10], [13], [16]
Технологии спутниковой связи	++	++	++	[10], [12], [13]
Интегрированные системы связи «берег–судно»	++	++	++	[10], [13]
Кибербезопасность	++	++	++	[13]
Оценка риска	+	++	++	[13]
Лидерство и работа в команде, сетевое общение	–	–	–	[10], [12], [13], [16]
Управление в аварийных и непредвиденных ситуациях	++	++	+	[13]
Нормативное обеспечение автономного судоходства	++	++	++	[13]
Интернет вещей	–	–	–	[10], [13], [16]

Примечания: 1. В таблице приняты следующие обозначения: «++» — данная компетенция непосредственно и однозначно указывается в соответствующем документе, «+» — данная компетенция вербально не обозначена, но достаточно явно следует из функций, задач и обязанностей, возлагаемых на оператора в соответствующем документе; «–» — данная компетенция ни в явном, ни в неявном виде в документе не определена. 2. В последнем столбце таблицы указаны основные библиографические источники (отчет ВАМУ и статьи), в которых приводится обоснование необходимости включения соответствующей компетенции в программу подготовки оператора автономного судна.

Обсуждение (Discussion)

Сопоставление систем сертификации операторов автономных судов, представленных в трех рассмотренных документах: Стандарте DNV, Кодексе SMI и Положениях РМРС, показывает, что каждая из этих систем имеет свою особенность. Так, в Стандарте DNV дано исчерпывающее описание всех компетенций оператора автономного судна и определены требования по всем аспектам системы сертификации: структуре подготовки, разработке программ подготовки, критериям оценивания компетентности, экзаменационному центру, тренажеру, инструкторах и экзаменаторах, вплоть до того, что предлагается рекомендуемая форма сертификата оператора. В Кодексе SMI отражена идея о том, что автономными могут быть суда, для управления которыми не требуется подготовка в соответствии с Конвенцией ПДНВ (маломерные суда, катера и т. п.). В Положениях РМРС показана непосредственная взаимосвязь подготовки и сертификации оператора автономного судна с квалификацией лоцмана.

В отношении компетенций, необходимых для управления автономными судами и представленных в табл. 4, значительная часть знаний, умений и навыков, составляющих эти компетенции, приобретается на этапе подготовки по программам, предусматривающим получение профессионального диплома моряка уровня управления. Компетенции оператора автономного судна формируются на основе морских компетенций путем добавления дополнительных знаний, умений и навыков, отражающих специфику обслуживаемых автономных судов, оборудования

и аппаратуры, используемой в конкретном ЦДУ, условий судоходства в обслуживаемой зоне. В основе всех трех рассмотренных нормативных документов требование о том, что оператор автономного судна должен иметь судоводительскую специальность. Дополнительные компетенции оператора, согласно требованиям Стандарта DNV, во многом относятся к другим специальностям (IT-специалисты, электромеханики, радиоспециалисты). Следует обратить внимание, что ни в одном из рассмотренных нормативных документов не упоминаются две компетенции, которые во многих использованных источниках предлагаются в качестве необходимых для оператора автономного судна. Первая такая компетенция связана с лидерством и работой в команде, межличностным и сетевым общением, вторая — с IoT-технологиями.

Заключение (Conclusion)

Уровень развития концепции автономного судоходства свидетельствует о необходимости анализа проблемы подготовки специалистов по управлению автономными судами, от решения которой во многом зависит безопасность людей, автономных и обычных судов, морской среды. Несмотря на большую работу ИМО по регламентации автономного судоходства на формирование полноценной международно-правовой базы для эксплуатации автономных судов потребуются еще не менее 10 лет. В реализованных к настоящему времени проектах по автономному судовождению подготовка операторов автономных судов осуществлялась на корпоративном уровне по уникальным «разовым» программам. В данной работе на основе анализа трех нормативных документов и библиографических источников сформированы основные компетенции, которые могут быть заложены в основу программы подготовки операторов автономных судов.

Содержание подготовки операторов автономных судов в значительной мере определяется спецификой работы ЦДУ, которая еще в полной мере не определена в силу отсутствия подобных реально действующих центров. Этим объясняется также отсутствие технического и нормативного обеспечения технологических и эксплуатационных процедур таких центров. Например, принципиальными остаются вопросы взаимодействия и ответственности ЦДУ, компании — собственника автономного судна и оператора, выполняющего функции капитана автономного судна.

В ближайшее время эксплуатация автономных судов будет развиваться на основе национальных и межгосударственных нормативов преимущественно в прибрежных водах, соответственно и подготовка операторов автономных судов будет осуществляться на корпоративном или национальном уровнях. Однако в дальнейшем в рамках проводимой ИМО международной регламентации при подготовке операторов автономных судов может быть использован подход, который находится в основе подготовки операторов систем управления движением судов. Для реализации этой цели необходима разработка модельного курса ИМО для операторов автономных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shahbakhsh M.* Industrial revolutions and transition of the maritime industry: The case of Seafarer's role in autonomous shipping / M. Shahbakhsh, G. R. Emad, S. Cahoon // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2022. — Vol. 38. — Is. 1. — Pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.ajsl.2021.11.004.
2. *Emad G.* Shipping 4.0 and Training Seafarers for the Future Autonomous and Unmanned Ships // 21th Marine Industries Conference (MIC 2019). — 2020. [Электронный ресурс] / G. Emad, M. Khabir, M. Shahbakhsh. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/338395285_Shipping_40_and_Training_Seafarers_for_the_Future_Autonomous_and_Unmanned_Ships (дата обращения: 22.12.22).
3. *Graff J.* e-Maritime: a framework for knowledge exchange and development of innovative marine information services / J. Graff // *WMU Journal of Maritime Affairs*. — 2009. — Vol. 8. — Pp. 173–201. DOI: 10.1007/BF03195159.
4. *Якунчиков В. В.* Состояние дел в автономном судоходстве. Дайджест-2022 / В. В. Якунчиков, В. П. Куприяновский. — М.: РYT, 2022. — 269 с.
5. UK to lead the way in training for autonomous shipping [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ukshipregister.co.uk/news/uk-to-lead-the-way-in-training-for-autonomous-shipping/> (дата обращения: 22.12.22).

6. Fugro receives the world's first professional certificate to operate uncrewed surface vessels [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.fugro.com/news/business-news/2022/fugro-receives-worlds-first-professional-certificate-operate-uncrewed-surface-vessels> (дата обращения: 22.12.22).
7. Marine autonomous surface ships (mass) for mates/masters [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.amcsearch.com.au/news/2022/mass-for-mates-masters> (дата обращения: 22.12.22).
8. Admiral Nevelskoy Maritime University will train specialists in a-Navigation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marinet.org/the-admiral-nevelskoy-maritime-state-university-will-train-a-navigation-specialists-from-2021/#more-1119> (дата обращения: 22.12.22).
9. В САФУ будут учить операторов безэкипажных судов на тренажере Sitronics [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/news/1679/90636/> (дата обращения: 22.12.22).
10. Investigating seafarer training needs for operating autonomous ships. Research Project FY2019. Final Report. — Tokyo: IAMU, 2020. — 22 p.
11. *Campos C.* The next step on the maritime education and training in the era of autonomous shipping: a literature review / C. Campos, M. Castells-Sanabra, A. Mual-Colilles // 9th International Conference on Maritime Transport. — Universitat Politècnica de Catalunya, 2022. DOI: 10.5821/mt.11004.
12. *Cicek K.* Future skills requirements analysis in maritime industry / K. Cicek, E. Akyuz, M. Celik // Procedia Computer Science. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 270–274. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.051.
13. *Deling W.* Marine Autonomous Surface Ship—a Great Challenge to Maritime Education and Training / W. Deling, W. Dongkui, H. Changhai, W. Changyue // American Journal of Water Science and Engineering. — 2020. — Vol. 6. — No. 1. — Pp. 10–16. DOI: 10.11648/j.ajwse.20200601.12.
14. *Bartusevičė I.* Maritime Education and training as a tool to ensure safety at sea in the process of introduction of maritime autonomous surface ships in shipping / I. Bartusevičė // Proceedings of 24th International Scientific Conference. Transport Means 2020. — Kaunas, Lithuania, 2020. — Part 1. — Pp. 368–374.
15. *Asterios L. C.* Autonomous ship — Education and skills building in maritime / L. C. Asterios. — Piraus: University of Piraus, 2020. — 58 p.
16. *Bachari-Lafteh M.* Operator's skills and knowledge requirement in autonomous ships control centre / M. Bachari-Lafteh, A. Harati-Mokhtari // Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping. — 2021. — Vol. 5. — Is. 2. — Pp. 74–83. DOI: 10.1080/25725084.2021.1949842.
17. *Yoshida M.* Regulatory Requirements on the Competence of Remote Operator in Maritime Autonomous Surface Ship: Situation Awareness, Ship Sense and Goal-Based Gap Analysis / M. Yoshida, E. Shimizu, M. Sugomori, A. Umeda // Applied Science. — 2020. — Vol. 10. — Is. 23. — Pp. 8751. DOI: 10.3390/app10238751.
18. *Hwang T.* Difficulty Evaluation of Navigation Scenarios for the Development of Ship Remote Operators Training Simulator / T. Hwang, I. H. Youn // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 18. — Pp. 11517. DOI: 10.3390/su141811517.
19. *Belev B.* Autonomous ships in maritime education model course 7.01 / B. Belev, A. Penev, Đ. Mohović, A. Perić Hadžić // Pomorstvo. — 2021. — Vol. 35. — No. 2. — Pp. 388–394. DOI: 10.31217/p.35.2.20.
20. *Lee C. H.* A Study on the New Education and Training Scheme for Developing Seafarers in Seafarer 4.0-Focusing on the MASS / C. H. Lee, G. Yun, J. H. Hong // Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety. — 2019. — Vol. 25. — Is. 6. — Pp. 726–734. DOI: 10.7837/kosomes.2019.25.6.726.
21. *Pundars B.* Autonomous shipping in changing the structures. Future implications on maritime education and training / Pundars B. — Kalmar: Novia, 2020. — 74 p.
22. MASS UK Industry Conduct Principles and Code of Practice Version 3. — London: Society of Maritime Industries (Maritime UK), 2019. — 104 p.
23. НД № 2–030101–037. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. — 96 с.
24. Certification scheme for remote control centre operators. Standard DNV-RP-0323. — Edition August 2021. — Måløy: Norwegian Ship Register, 2021. — 34 p.
25. Competence of Remote Control Centre Operators. Standard DNV-ST-0324. Edition October 2022. Norwegian Ship Register. — Måløy, 2022. — 32 p.
26. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. — Лондон: ИМО, 2013. — 413 с.
27. Assessment, Examination and Certification of Seafarers. Model Course 3.12. — London: IMO, 2017. — 187 p.
28. MSC–MEPC.2/Circ.12/Rev.2. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. — April 2018. — 71 p.

REFERENCES

1. Shahbakhsh, Mehrangiz, Gholam Reza Emad, and Stephen Cahoon. "Industrial revolutions and transition of the maritime industry: The case of Seafarer's role in autonomous shipping." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 38.1 (2022): 10–18. DOI: 10.1016/j.ajsl.2021.11.004.
2. Emad, Gholam Reza, Mohsen Khabir, and Mehrangiz Shahbakhsh. "Shipping 4.0 and Training Seafarers for the Future Autonomous and Unmanned Ships." *21th Marine Industries Conference (MIC 2019)*. Web. 22 Dec. 2022 <https://www.researchgate.net/publication/338395285_Shipping_40_and_Training_Seafarers_for_the_Future_Autonomous_and_Unmanned_Ships>.
3. Graff, Jerzy. "e-Maritime: a framework for knowledge exchange and development of innovative marine information services." *WMU Journal of Maritime Affairs* 8 (2009): 173–201. DOI: 10.1007/BF03195159.
4. Yakunchikov, V.V., and V. P. Kupriyanovskii. *Sostoyanie del v avtonomnom sudokhodstve. Daidzhest-2022*. M.: RUT, 2022.
5. UK to lead the way in training for autonomous shipping. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.ukshipregister.co.uk/news/uk-to-lead-the-way-in-training-for-autonomous-shipping/>>.
6. Fugro receives the world's first professional certificate to operate uncrewed surface vessels. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.fugro.com/news/business-news/2022/fugro-receives-worlds-first-professional-certificate-operate-uncrewed-surface-vessels>>.
7. Marine autonomous surface ships (mass) for mates/masters. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.amcsearch.com.au/news/2022/mass-for-mates-masters>>.
8. Admiral Nevelskoy Maritime University will train specialists in a-Navigation. Web. 22 Dec. 2022 <<https://marinet.org/the-admiral-nevelskoy-maritime-state-university-will-train-a-navigation-specialists-from-2021/#more-1119>>.
9. V SAFU budut učit' operatorov bezekipazhnykh sudov na trenazhere Sitronics. Web. 22 Dec. 2022 <<http://www.morvesti.ru/news/1679/90636/>>.
10. *Investigating seafarer training needs for operating autonomous ships*. Research Project FY2019. Final Report. Tokyo: IAMU, 2020.
11. Campos Cristina, Marcella Castells-Sanabra, and Anna Muijal-Colilles. "The next step on the maritime education and training in the era of autonomous shipping: a literature review." *9th International Conference on Maritime Transport*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2022. DOI: 10.5821/mt.11004.
12. Cicek, Kadir, Emre Akyuz, and Metin Celik. "Future skills requirements analysis in maritime industry." *Procedia Computer Science* 158 (2019): 270–274. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.051.
13. Deling, Wang, Wu Dongkui, Huang Changhai, and Wu Changyue. "Marine Autonomous Surface Ship—a Great Challenge to Maritime Education and Training." *American Journal of Water Science and Engineering* 6.1 (2020): 10–16. DOI: 10.11648/j.ajwse.20200601.12.
14. Bartusevičienė, Inga. "Maritime Education and training as a tool to ensure safety at sea in the process of introduction of maritime autonomous surface ships in shipping." *Proceedings of 24th International Scientific Conference. Transport Means 2020*. Part 1. Kaunas, Lithuania, 2020. 368–374.
15. Asterios, L. C. *Autonomous ship — Education and skills building in maritime*. Piraeus: University of Piraeus, 2020.
16. Bachari-Lafteh, Mohammadreza, and Abbas Harati-Mokhtari. "Operator's skills and knowledge requirement in autonomous ships control centre." *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 5.2 (2021): 74–83. DOI: 10.1080/25725084.2021.1949842.
17. Yoshida, Masanori, Etsuro Shimizu, Masashi Sugomori, and Ayako Umeda. "Regulatory requirements on the competence of remote operator in maritime autonomous surface ship: Situation awareness, ship sense and goal-based gap analysis." *Applied Sciences* 10.23 (2020): 8751. DOI: 10.3390/app10238751.
18. Hwang, Taemin, and Ik-Hyun Youn. "Difficulty Evaluation of Navigation Scenarios for the Development of Ship Remote Operators Training Simulator." *Sustainability* 14.18 (2022): 11517. DOI: 10.3390/su141811517.
19. Belev, Blagovest, Angel Penev, Đani Mohović, and Ana Perić Hadžić. "Autonomous ships in maritime education model course 7.01." *Pomorstvo* 35.2 (2021): 388–394. DOI: 10.31217/p.35.2.20.
20. Lee, Chang-Hee, Gwi-ho Yun, and Jung-Hyeok Hong. "A Study on the New Education and Training Scheme for Developing Seafarers in Seafarer 4.0-Focusing on the MASS." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 25.6 (2019): 726–734. DOI: 10.7837/kosomes.2019.25.6.726.
21. Pundars, B. *Autonomous shipping in changing the structures. Future implications on maritime education and training*. Kalmar: Novia, 2020.

22. *MASS UK Industry Conduct Principles and Code of Practice Version 3*. London: Society of Maritime Industries (Maritime UK), 2019.
23. ND 2–030101–037. *Polozheniya po klassifikazii morskikh avtonomnih i distanzionno upravlyaemih nadvodnih sudov (MANS)*. SPb.: RMRS, 2020.
24. *Certification scheme for remote control centre operators. Standard DNV-RP-0323*. Edition August 2021. Måløy: Norwegian Ship Register, 2021.
25. *Competence of Remote Control Centre Operators. Standard DNV-ST-0324*. Edition October 2022. Norwegian Ship Register. Måløy, 2022.
26. *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping of Seafarers*. London, 2013.
27. *Assessment, Examination and Certification of Seafarers. Model Course 3.12*. London: IMO, 2017.
28. *MSC–MEPC.2/Circ.12/Rev.2. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*. April 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 23 января 2023 г.
Received: January 23, 2023.

SPLINE STANDARD OF MAPPED INFORMATIVENESS OF CORRELATION-EXTREME NAVIGATION AS THE POTENTIAL OF CYBERNETIC SITUATIONAL AWARENESS

I. V. Yuyukin

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

A hypothesis about the possibility of using a spline standard of mapped informativeness of correlation-extreme navigation as a potential for cybernetic awareness is put forward. The expediency of understanding cybernetic awareness as an ontological engineering of the geometric implementation of a spline fragment of mapping to ensure the principle of alternative positioning is revealed. The forecast of the achievability of the effect of the vessel location predictability in the local environment of the satellite signals incapacity in the practical realization of the potential of situational awareness is made. The possibility of conceptual resistance of the developed algorithms of malicious virtual interference due to the unique composition of spline functions in assessing the vulnerability of the bridge onboard computers to a cybernetic threat is substantiated. Attention is focused on the fundamental impossibility of distorting the spline standard of informativeness to disrupt the classical process of linking the measured exposure of the navigation field to the reference one to ensure autonomous positioning of moving objects in any hacker attacks on the target mathematical asset. The main reason for the stability of approximation constructions, which lies in the piecewise architecture of the spline, when local violations of mathematical composition do not affect the overall task of forming a realistic navigation isosurface as a graphical structure of semantic modeling, is revealed. The proposals of effective information processing as attributes of cybernetic awareness are tested on the example of computer visualization of measuring fields of bathymetry and maps of magnetic anomalies in the form of fragments of three-dimensional spreading of the planetary magnetic field. The developed package of application programs is adapted to synthesize a spline standard of mapped informativeness in the cybernetic awareness paradigm as an intellectual support for decision-making by a navigator in order to reduce his psychological cognitive load. It is proposed to use the potential of situational awareness as a mathematical support for an automated navigation system with artificial intelligence within the framework of the concept of unmanned navigation in strategic accordance with the A-Navigation project. The fundamental importance of a positive assessment of cybernetic awareness in promoting the practical use of autonomous marine surface vessels in modern navigation practice is determined.

Keywords: cybernetic awareness, ontological engineering, vulnerability assessment, semantic modeling, cognitive load, situation awareness.

For citation:

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

УДК 656.61.052 656

СПЛАЙНОВЫЙ ЭТАЛОН КАРТОГРАФИРОВАННОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ КАК ПОТЕНЦИАЛ КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ

И. В. Ююкин

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

Выдвинута гипотеза о возможности использования сплайнового эталона картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической осведомленности. Выявлена целесообразность понимания кибернетической осведомленности как онтологического инжиниринга геометрической реализации сплайнового фрагмента картографирования для обеспечения

принципа альтернативного позиционирования. Дан прогноз достижимости эффекта предсказуемости местоположения судна в локальной среде недееспособности спутниковых сигналов при практической реализации потенциала ситуационной осведомленности. Обоснована возможность концептуальной устойчивости разработанных алгоритмов злонамеренного виртуального вмешательства за счет уникальной композиции сплайн-функций при оценке уязвимости бортовых компьютеров мостика кибернетической угрозе. Акцентируется внимание на принципиальной невозможности искажения сплайнового эталона информативности для нарушения классического процесса привязки измеренной экспозиции навигационного поля к опорному для обеспечения автономного позиционирования подвижных объектов при любых попытках хакерских атак на целевой математический актив. Выявлена главная причина устойчивости аппроксимационных конструкций, заключающаяся в кусочной архитектуре сплайна, когда локальные нарушения математической композиции не отражаются на общей задаче формирования реалистичной навигационной изоповерхности как графической структуры семантического моделирования. Апробированы предложения эффективной обработки информации в качестве атрибутов кибернетической осведомленности на примере компьютерной визуализации измерительных полей батиметрии и карты магнитных аномалий в виде фрагментов трехмерного спрединга планетарного магнитного поля. Разработанный пакет прикладных программ адаптирован для синтеза сплайнового эталона картографированной информативности в парадигме кибернетической осведомленности в качестве интеллектуальной поддержки принятия решений судоводителем с целью снижения его психологической когнитивной нагрузки. Предложено использовать потенциал ситуационной осведомленности как математическое обеспечение автоматизированной системы судовождения с искусственным интеллектом в рамках концепции безэкипажного судоходства в стратегическом соответствии с проектом A-Navigation. Определено принципиальное значение положительной оценки кибернетической осведомленности в продвижении практического использования морских автономных надводных судов в современной практике судовождения.

Ключевые слова: кибернетическая осведомленность, онтологический инжиниринг, оценка уязвимости, семантическое моделирование, когнитивная нагрузка, ситуационная осведомленность.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Сплайновый эталон картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической ситуационной осведомленности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.

Введение (Introduction)

Термин «осведомленность» в рамках подхода оценки кибернетической безопасности фокусирует решение вопросов устойчивости функционирования электронных систем в пространственно-временном континууме как единое онтологическое обоснование с предоставлением математического и компьютерного обеспечения поддержки принятия решений оператору управления подвижных объектов в качестве реализации ситуационной осознанности потенциальной возможности хакерских угроз для своевременной организации корректирующих действий [1]. Под онтологическим инжинирингом понимается используемый метод знаний в определенной предметной области и связанные свойства объектов управления в информационном домене [2], [3]. В практических приложениях кибернетическую осведомленность необходимо расценивать как понимание и контроль состояния профессиональной кибернетической среды в виде информации о критических уязвимостях автоматизированных систем с точки зрения предотвращения хакерских угроз, использующих обнаруженные критические уязвимости с возможностью осуществления релевантного прогноза последствий кибернетических атак на ближайшее будущее [4].

Концепция кибернетической осведомленности с явным положительным эффектом успешно применяется в следующих современных цифровых технологиях: промышленном интернете вещей, 3D-моделировании, нейросети, облачных вычислениях, виртуальной и дополненной реальности, компьютерной имитации на основе цифровых двойников, аддитивных технологиях, промышленном использовании распределенных реестров Blockchain, онтологической формализации системной деятельности, теории нечетких множеств [5]. Ситуационная осведомленность в различных прикладных приложениях реализуется как обеспокоенность по вопросам кибернетической халатности, связанной с переходным периодом цифровой трансформации и изменениями в бизнес-моделях предприятий для поддержания на высоком уровне требований безопасности квалифицированных

специалистов в области информационных технологий. Если раньше компании скрывали инциденты кибернетических атак, то сейчас такие виртуальные инциденты и их последствия предаются огласке с целью нивелирования высокой подверженности ошибкам современных систем управления.

Понятие кибернетической осведомленности трансформировалось из идеи бывшего главного научного сотрудника ВВС США М. Эндсли, суть которой состояла в практическом применении технологии ситуационной осведомленности пилота для валидационной оценки уязвимости компьютерных систем воздушного судна [6]. Исходный принцип ситуационной осведомленности определяется М. Эндсли как когнитивное восприятие оператором элементов окружающей обстановки в едином пространственно-временном континууме при осознанном понимании стратегии управления с проецированием прогнозов персонала в ближайшем будущем [7]. В современном практическом аспекте кибернетическая ситуационная осведомленность понимается как комбинация мер формализованной оценки риска в виде комплекса стратегий обеспечения безопасности на фоне кибернетического ландшафта злоумышленных угроз в единой системе координат на основе *семантического моделирования* [8].

Парадигма кибернетической осведомленности в вопросах безопасности информационного целевого актива *авионики* однозначно формирует прогностический сценарий эффективного предотвращения экстремальных ситуаций в авиации [9]. Аналогично в вопросах безопасности современного судовождения без использования концепции ситуационной осведомленности не может быть эффективного обеспечения защиты бортовых компьютеров навигационного мостика от целенаправленного вектора каскадных кибернетических атак.

В понимании специалистов, занимающихся изучением влияния человеческого фактора осведомленность определяется как интуитивное восприятие элементов деструктивной информационной обстановки с осознанным интерпретированием угроз кибернетической безопасности при проецировании последствий хакерских атак в статус ближайшего будущего [10]. В практической реальности отсутствует четкое осознание экспертами кибернетических прогнозов применимости искусственного интеллекта. В связи с этим необходимо рассматривать функционирование парадигмы ситуационной осведомленности на основе принципа «черного ящика» как понимание того, что при детальном рассмотрении концепции безопасности найдутся существенные неучтенные факторы [11]. Поэтому командную работу в условиях общей осведомленности персонала о ситуации системной безопасности лучше всего поддерживать умеренным уровнем объяснений при реализации разработки стратегии эффективной коммуникации без накладных расходов на связь в процессе организации комфортной когнитивной нагрузки оператора для выполнения динамичных и ограниченных по времени задач [12].

В рамках данного исследования представляется целесообразным применить концепцию кибернетической осведомленности для целей судовождения в приложении использования корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС) для реалистичной оценки кибернетической безопасности морского транспорта [13]. Под термином «киберситуационная осведомленность» в судовождении необходимо понимать фактологическую осведомленность в геометрической интерпретации онтологии сплайнового эталона картографирования корреляционно-экстремальной навигации как оптимального синтеза трехмерного фрагмента геофизического поля для обеспечения принципа, являющегося альтернативным для спутниковых систем позиционирования с синхронной возможностью инициирования кибернетической безопасности КЭНС от непредсказуемого сценария хакерских угроз.

В обстоятельствах неопределенности спутниковых систем проблемы их уязвимости могут быть кардинальным образом нивелированы за счет использования технических средств судовождения, основанных на принципиально иных физических принципах работы. Необходимость поиска дублирующей системы GPS с перспективной системой обработки навигационной информации мотивирована возможностью повышения надежности альтернативного позиционирования для решения спуфинговых и джамминговых проблем в рамках развития концепции ситуационной осведомленности как для аэрокосмической, так и для морской индустрии [14]–[16]. В качестве пер-

спективного варианта автономного позиционирования предлагается *корреляционно-экстремальная навигация* с практической реализацией методов сплайн-функций. Принцип позиционирования корреляционно-экстремальной навигации реализуется как многократно повторяющаяся задача мгновенных сопоставлений последовательности навигационных измерений с графическим эталоном информативности геофизического поля, хранящимся в оперативной памяти бортового компьютера при финальной прогностической оценке правильности результата на основе базовой концепции кибернетической осведомленности.

Практическая реализация потенциала кибернетической осведомленности в судовождении позволяет сделать прогноз достижимости эффекта безусловной предсказуемости местоположения судна в локальной среде недееспособности спутниковых сигналов при оптимальном управлении движением с помощью компьютерного моделирования при условии предвидения точной оценки неопределенности навигационной системы. Апробированные на методах сплайн-функций алгоритмы обеспечения альтернативного позиционирования выполнены в качестве интеллектуальной поддержки судоводительского состава по управлению судном в условиях нештатной ситуации кибернетической угрозы как уязвимости атрибута кибернетической осведомленности.

В ходе практической реализации исследования по вопросам применения сплайн-функций в парадигме кибернетической осведомленности сформулированы следующие задачи:

1. Аналитический обзор проблематики кибернетической осведомленности в судовождении на основе использования концепции информационного эталона КЭНС с целью инновационного обеспечения альтернативы спутниковой навигации.

2. Анализ преимуществ применения технологии кибернетической осведомленности как развитие постулатов ситуационной осведомленности с целью усиления стандартов безопасности судовождения.

3. Рассмотрение вопроса развития концепции кибернетической осведомленности в аспекте дублирования спутниковых систем перспективными вариантами альтернативной навигации.

4. Формирование точки зрения об эффективности применения гипотезы кибернетической осведомленности в качестве формализованной оценки риска в морской навигации.

5. Адаптация к задаче корреляционно-экстремальной навигации алгоритмов сплайн-функций с целью моделирования эталона информативности как постулата кибернетической осведомленности.

6. Модификация прикладных паскаль-программ применительно к задаче оптимизации компьютерной трехмерной визуализации картографического эталона КЭНС на основе использования гибридного алгоритма двумерной аппроксимации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предполагается использовать синтезированный сплайновый эталон картографированной информативности как потенциал кибернетической осведомленности. Инновационный подход позиционирования основан на мгновенном сопоставлении полученных измерений навигационного поля с априорной информацией о нем, хранящейся в оперативной памяти бортового компьютера. Фактически модифицированный процесс навигации движущегося объекта реализуется как многократно повторяющаяся задача так называемой *привязки измерительного фрагмента*, зафиксированного бортовой аппаратурой в процессе движения, к предварительно созданному эталону картографированного поля с геометрически замкнутой географической областью. Задача навигации, в конечном счете, сводится к совмещению двух изоповерхностей при автоматическом определении максимальной степени близости текущего измерительного изображения к опорному эталону навигационного поля как атрибуту кибернетической осведомленности.

Под *информативностью* понимается мера, определяющая эффективность использования изотропного поля для вычисления координат местоположения транспортного средства. Вариативно информативность поля, характеризующегося неоднородностью по разным направлениям, может быть представлена в виде карты. Картографирование позволяет выделить области геофизического

поля, пригодные для целей навигации с дальнейшим их использованием для выбора информативного маршрута транспортного средства. Характеристики информативности поля могут служить в качестве показателей, определяющих возможность использования данных измерений физических параметров для решения навигационной задачи на основе использования КЭНС.

Применение картографированной информативности в целях навигации реализуется при наличии на борту виртуального носителя эталонной карты зоны коррекции навигационного поля. Навигационный датчик сканирует фрагмент поля в виде последовательности отсчетов физических данных с постоянным шагом вдоль траектории. Непосредственная задача метода коррекции состоит в том, чтобы путем привязки измеренного фрагмента поля к эталонной карте постоянно фиксировать географические координаты. Уточнение измерений выполняется методом поиска максимального или минимального экстремума функционала сравнения измеренного фрагмента с эталоном, полученным из информативности карты навигационного поля для безусловного подтверждения гипотез об искомых навигационных параметрах.

В ситуации кибернетической угрозы практически невозможно исказить сплайновый эталон картографированной информативности как визуализированную базовую экспозицию. Манипуляция графическими всплесками невозможна на основе зловредного оперирования специальными математическими коэффициентами методом искусственных алгоритмических подстановок, так как в реальности в бортовом обеспечении программы заложено использование машинных кодов, а не работа с файлами в исходных текстах языка программирования. Кроме того, уникальная математическая композиция сплайн-функций концептуально противодействует стороннему вмешательству злоумышленников. Таким образом, ни при каких обстоятельствах не нарушается классический процесс привязки измеренного фрагмента навигационного поля к опорному эталону, и тем самым обеспечивается автономное точное позиционирование подвижных объектов при попытках хакерских атаках на целевой математический актив.

Главная причина устойчивости сплайновых конструкций заключается в кусочной математической архитектуре сплайна, когда локальные нарушения математической композиции не отражаются на общей задаче аппроксимации. Базисные финитные функции алгоритмически препятствуют злоумышленной трансформации многозвенной структуры. Кубический B -сплайн может быть выражен в виде разложения на набор многочленов на каждом пятикратном узловом полигоне сеточных контрольных точек [17]. Пять опорных точек, характеризующих кубический B -сплайн, алгоритмически минимизированы до числа базовых точек данного интерполянта, что позволяет непосредственно сформировать процесс оптимизации интерполяции в глобальном масштабе, нивелируя возможные локальные искажения.

Кибернетическое преимущество изоповерхности, построенной при помощи B -сплайнов третьей степени, заключается в том, что изменение одной из характеристических точек линии равного значения навигационного параметра вызывает изменение только четырех последовательных сегментов изолинии, что фактически означает локальность корректировки общей формы без стратегической модификации всей изолинии, поскольку сплайн представляет собой вторичную абстракцию по отношению к оригинальной изоповерхности. Ассоциированный финитный сплайн, синтезирующий по пяти дискретным данным в каждом элементе сплайнового набора искусственную кусочную конструкцию, не заменяет фактическую интерполируемую кривую, но при этом формирует максимально близкую к реальности навигационную изолинию. В худшем варианте кибернетической атаки даже искаженный единичный B -сплайн не препятствует последовательному соединению фрагментарных носителей без резких функциональных изменений и разрывов, что формирует реалистичную «склеенную» геометрическую форму в целом при любых геометрических неблагоприятных обстоятельствах. Дополнительным фактором кибернетической неуязвимости является запрограммированная возможность целенаправленного варьирования группой масштабирующих коэффициентов на основе всестороннего понимания теории сплайн-функций и определенного интеллектуального искусства синхронного балансирования сплайновыми параметрами.

Стратегически кибернетическую защиту обеспечивает корреляционно-экстремальная доктрина как система обработки информации на основе реализации целевой функции, предназначенной для определения координат движения. Для формирования экстремума традиционно используется корреляционное свойство достижения максимума при нулевом значении аргументов. Практическое применение исследуемого помехоустойчивого подхода автоматически создает проблему эффективного синтеза математической модели навигационного поля как базовой основы обеспечения безопасности корреляционно-экстремальной навигации.

Уровень изучения ситуационной осведомленности как предпосылки кибернетической осведомленности за последние три десятилетия позволяет исследовать не только кибернетические конструкции, но и давать оценку чувствительности и прогнозирования в аспекте корреляции с объективными показателями информированности о ситуации. С целью достижения конкретных результатов использовался ряд подходов: применение показателей эффективности и меры, направленные на оценку уровня знаний и понимания оператора о ситуации посредством прямого опроса индивида. Большинство исследований были сосредоточены на непосредственном определении *человеческого фактора* как источника знаний посредством субъективной или объективной оценки. Проведение рейтингов наблюдателей ситуационной осведомленности позволяет преодолеть определенные проблемы с самооценкой, но этот процесс еще подвержен влиянию субъективных факторов в вопросе эффективности функционирования сложной технической системы, поскольку сторонние наблюдатели имеют ограниченную информацию о ментальном состоянии человека, работающего внутри сложной технической системы.

Несмотря на то, что указанные показатели дают условное представление о том, как персонал развивает ситуационную осведомленность, фактически они могут использоваться только для косвенного определения качества и полноты результирующей концепции осведомленности в виде понимания состояния знаний о ситуации, полученных вовлеченными лицами. Знания и возможности отдельного человека, а также доступные системные интерфейсы определяют степень успешности используемых процессов при создании точного понимания ситуационной осведомленности. Поэтому даже два человека, вовлеченные в один и тот же процесс, могут не достигнуть одинаковой степени осведомленности. Кроме того, эти методы, как правило, дают лишь частичное представление о том, какая информация обрабатывается и как именно она используется для формирования проекционного понимания ситуации в смысле оперативного принятия обоснованных решений. Хотя сбор данных о производительности автоматизированной системы в целом презентативен, но основным ограничением этого класса мер является то, что они позволяют сделать вывод о ситуационной осведомленности только косвенно, что может являться аргументом без достаточной детализации или диагностичности о том, что, по мнению оператора, происходило на самом деле.

Двумя наиболее часто используемыми технологиями практического применения ситуационной осведомленности являются методика глобальной оценки и текущая оценка существующей ситуации [18]. При использовании глобальности моделирование репрезентативных задач или сценариев замораживается в течение случайно выбранного времени, когда персонал быстро отвечает на вопросы о текущем восприятии ситуации. Вопросы могут быть сформулированы устно или на компьютере для удобства администрирования. Затем восприятие людей сравнивается с реальной ситуацией на основе семантического моделирования для обеспечения объективной оценки ситуационной осведомленности. Оценка некоторых запросов, связанных с пониманием ситуации, может быть предоставлена экспертами по предмету, которые хорошо владеют ситуацией на момент фиксации. По результатам опроса получают несколько «моментальных снимков» ситуационной осведомленности с обеспечением оценки качества ситуации конкретным дизайном системы. Глобальный подход предоставляет объективную, непредвзятую оценку ситуационной осведомленности на основе обработки запросов в произвольное время по сценарию как в периоды высокой, так и в периоды низкой рабочей нагрузки, он содержит запросы широкого спектра требований ситуационной осведомленности для данной работы, включая восприятие данных, понимание смысла и прогнозирование на ближайшее будущее.

Риски прогнозирования включают предсказание функционирования и возможного статуса системы, а также определение соответствующих особенностей внешней среды и команды специалистов в зависимости от обстоятельств с представлением результата в процентах правильности для каждого запроса на основе оперативно значимых диапазонов допусков. Глобальная оценка включает запросы по всему спектру индивидуальных требований к ситуационной осведомленности. Этот подход сводит к минимуму возможное смещение внимания, поскольку опрашиваемые не могут подготовиться к опросам заранее. Методика текущего восприятия процесса успешно реализует проверку в режиме реального времени для оценки ситуационной осведомленности. Однако обычно запросы предоставляются в режиме реального времени, в то время как человек выполняет свои обычные оперативные задачи. В дополнение к точности ответа измеряемое время, необходимое для ответа на каждый запрос в устной форме, организует специальный формат мозгового штурма в реальном времени.

Безусловно, важным является изучение существующей исследовательской базы для определения того, насколько хорошо эти два подхода объективной оценки ситуационной осведомленности «работают» с точки зрения чувствительности и прогностической способности. Чтобы получить более четкое представление о полезности и валидности этих двух показателей, был проведен специальный анализ. В процессе эмпирических исследований, посвященных двум указанным методологическим направлениям, были рассмотрены вопросы *потенциальной интрузивности мер* с точки зрения их зависимости от рабочей памяти оператора с учетом компромиссов между скоростью и точностью принятия решений, а также потенциальных проблем с рабочей когнитивной нагрузкой на фоне общего дизайна опроса.

Вопрос, вызывающий озабоченность современных исследователей, заключался в том, *является ли показатель осведомленности прогностическим для оценки ситуации*. Большинство исследований было проведено в авиации, вооруженных силах, управлении технологическими процессами, морской индустрии, а также при изучении вопроса эффективного маневрирования подводных лодок. Было установлено, что глобальные и текущие оценки оказывают одинаковое влияние на производительность мыслительных способностей оператора, однако тщательный анализ показал, что текущая оценка имеет значительно меньшую чувствительность по сравнению с глобальной (64 % против 94 % соответственно) [19].

Таким образом, анализ эмпирических исследований выявил, что меньшая чувствительность текущей оценки напрямую влияет на выполнение основной задачи, затрудняя измерение ситуационной осведомленности с учетом компромиссов между скоростью и точностью принятия решения при корреляции с рабочей когнитивной нагрузкой. Методика глобальной оценки имеет более высокий уровень чувствительности, компенсирующий ограничение памяти оператора. Это дает очевидное преимущество как для индивидуальной, так и для командной оценки ситуационной осведомленности в различных прикладных областях и экспериментальных условиях.

Кибернетическая осведомленность фактически организует вероятностный подход, ориентированный на риск, предназначенный для декомпозиции угроз и оценки нарушений кибернетической безопасности в сложных технических системах [20]. Риск рассматривается как сочетание последствий некоторого инцидента и связанной с ним возможности возникновения нарушений кибербезопасности в качестве экстремальной ситуации [21]. Как формализованное понимание процедуры безопасности судовождения оценка риска является сформированным систематизированным примером практического применения вероятностного прогноза в виде комбинации частоты и ответственности за произошедшее аварийное происшествие с учетом принципов предварительной реализации подхода кибернетической осведомленности.

Результаты (Results)

Апробированными предложениями эффективной обработки информации в качестве атрибутов кибернетической осведомленности для практического применения корреляционно-экстремальной навигации являются следующие варианты:

1-й вариант — компьютерная визуализация измерительных полей батиметрии для визуализации рельефа подводной топографии фрагментов морской среды Тирренского моря и акватории Вудс-Хоула;

2-й вариант — синтезирование карты магнитных аномалий как виртуального трехмерного спрединга планетарного магнитного поля.

Указанные варианты допускают теоретическое обобщение синтезирования информационных полей методами сплайн-функций при обеспечении оценивания точности сопоставления эталонных моделей с измерительными данными по экстремальным показателям. Картографирование эталона информативности поля на основе кусочной аппроксимации автоматически обеспечивает экономную организацию цифровой базы модельных данных эталона поля. Оптимальные результаты могут быть достигнуты с помощью кубических *B*-сплайнов, обеспечивающих, благодаря конструктивной особенности базисной структуры, четырехкратное сжатие массивов данных по сравнению с традиционными методами [22].

Использование магнитного поля Земли или гридированных данных промеров глубин для навигации представляется перспективным направлением исследований в качестве инновационной альтернативы для других глобальных систем позиционирования. Магнитная навигационная система консолидирует данные магнитометра с использованием карты магнитных аномалий для определения текущего местоположения подвижной технической единицы в масштабе реального времени. Полученные многочисленные экспериментальные результаты в значительной степени подтверждают применимость КЭНС для отслеживания движущихся объектов за счет применения нового принципа позиционирования с оценкой местоположения мобильного транспортного средства посредством анализа данных, репродуцированных бортовыми датчиками магнитного поля.

Важным аспектом успешной практической реализации магнитной и батиметрической навигации является *формирование оптимального эталона картографирования* как меры информативности в парадигме кибернетической осведомленности, определяющей эффективность использования разновидности геофизического поля для получения обсервации. Информативность навигационного поля практически определяется объемной конфигурацией бортовой электронной карты для некоторой площади характерной стохастической поверхности с целью практической реализации процедуры привязки. При этом перспективная навигация с коррекцией по специальной карте реализуется в качестве последовательности мгновенных сопоставлений технических измерений специализированной аппаратуры с эталоном информативности, хранящимся в памяти бортового компьютера. Инновационный вариант навигации необходимо понимать как уточнение измерений на основе поиска глобального экстремума функционала корреляционного сравнения с применением постулата кибернетической осведомленности.

На рис. 1 представлена трехмерная визуализация варианта представления информации по оценке глубины, полученной океанографическим исследовательским институтом штата Массачусетс для акватории Вудс-Хоул [23]. Цифровую модель на основе гридированных данных для трехмерной визуализации подводной топографии, приведенную на рис. 1 с математической точки зрения можно охарактеризовать как классическую блочную матрицу, каждый элемент которой задействуется при визуализации изображения 3D-формата для каждого отдельного пикселя объемной электронной карты.

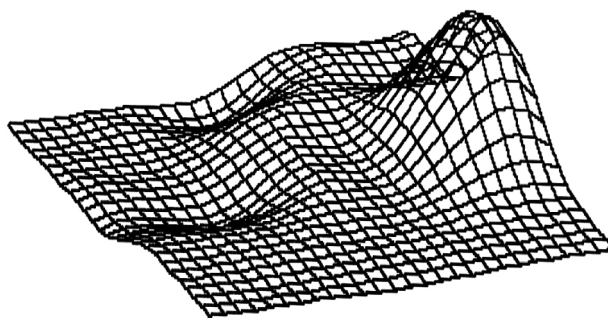


Рис. 1. Трехмерная визуализация гридированных данных синтезированного картографирования подводной топографии Вудс-Хоул

Абстрактный характер конкретизированного представления матриц получает конкретное воплощение при программной реализации гибридного сплайнового алгоритма для визуализации моделирования профиля дна судоходных акваторий. Гридированные данные при этом интерпретируются как результаты промеров глубин с переменным разрешением для формализованного представления двумерной сетки зафиксированных измерений для восстановления навигационной изоповерхности в трехмерном пространстве. Координатный набор узлов выполняет роль математической основы для синтеза поверхности морского дна с целью визуализации трехмерного отображения подводного ландшафта в электронной картографии. Наборы батиметрических данных должны быть предварительно обработаны на основе алгоритма регулярно структурированной сетки и преобразованы в цифровую модель рельефа местности с помощью методов интерполяции в целях информационного обеспечения различных векторных слоев электронной карты.

Скриншот как графический результат работы пакета прикладных программ по синтезированию топографии морского дна с использованием методов сплайн-функций показан на рис. 2 в парадигме расширения возможностей универсального стандарта обмена гидрографических данных S-100 [24]. На основе технологии сплайн-функций на данном рисунке восстановлена трехмерная перспектива изолинейной батиметрической модели исследованной акватории Тирренского моря.

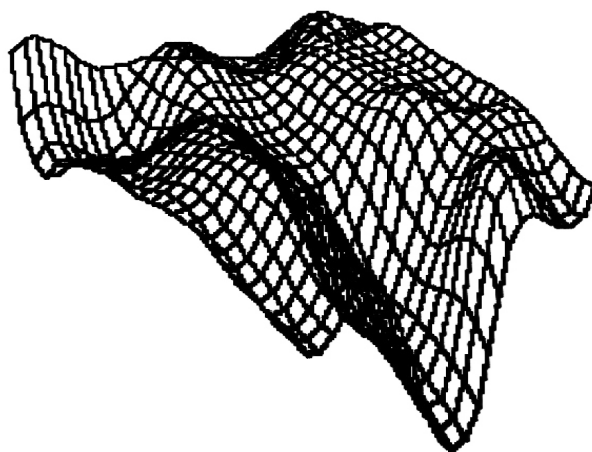


Рис. 2. Трехмерная визуализация сплайнового картографирования топографии дна морской акватории Тирренского моря

Математическое синтезирование изоповерхности подводной топографии восточного побережья о-ва Джильо реализовано на основе апробированной гибридной сплайновой модели при использовании измерительных батиметрических данных. В качестве сеточной основы для реализации сплайновой технологии использовалась матрица размером 9×15 в соответствии с оцифровкой географической системы координат при общем количестве 135 измерительных фиксаций глубины. По широте задействовались девять узловых точек, по долготе — 15 точек. С целью достижения реалистичности изображения были введены дополнительные узловые точки на основе принципа деления первоначальных сеточных сегментов пополам. При внимательном изучении рисунка можно установить, что топография морского дна по форме напоминает чашу, глубина которой увеличивается по мере удаления от береговой линии.

Смоделированная объемная карта магнитных аномалий на рис. 3 представляет практическую целесообразность в целях околосредней навигации в рамках проекта аэронавигационного применения аномалий магнитного поля Земли в вопросе магнитного позиционирования на основе графической трансформации экспериментального опыта в виде сплайнового эталона информативного картографирования. По последним опубликованным научным данным, практическое применение магнитного позиционирования в перспективной авионике обеспечивает превосходство инновационного подхода в реальных результатах погрешности определения координат в 10 м, что, в принципе, сопоставимо с точностью спутниковой навигации [25].

В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась базовая матрица размером 9×9 при общем количестве восьмидесяти одной реперной точки как репродуцированных цифровых значений с контурной карты изолиний. По широте и долготе было задействовано девять узловых точек. С целью гладкого приближения продемонстрированной на рис. 3 трехмерной перспективы карты магнитных аномалий использовались 36 добавочных точек по каждой координате на фрагментированном аппроксимационном полигоне. Добавочные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов согласно *схеме Марседена*. Две графические позиции всплесковых увеличений напряженности исследуемого магнитного поля синхронно воспроизведены на рисунке геометрическими флуктуациями как артефакты сплайновой перспективы восстановленной изоповерхности [26].

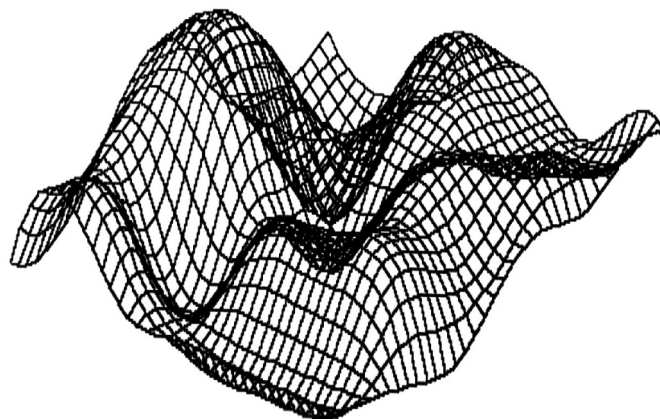


Рис. 3. Скриншот сплайн-аппроксимированной карты магнитных аномалий

Приведенные примеры на рис. 1–3 необходимо расценивать как конкретные возможности практической реализации потенциала кибернетической осведомленности. Представленная геометрическая информация как исходная основа ситуационной осведомленности имеет решающее значение для поддержки принятия решений искусственным интеллектом в существующих автономных системах судоходства, поскольку окончательное решение реализуется на основе строгих графических сопоставлений. Предлагаемый подход может быть использован как математическое обеспечение будущей автоматизированной системы судовождения с искусственным интеллектом в рамках концепции безэкипажного судоходства в стратегическом соответствии с проектом A-Navigation.

Обсуждение (Discussion)

Предполагается, что в ближайшем будущем в водной транспортной системе будут сосуществовать суда с разной степенью автономности, образуя комбинированную водную транспортную систему. Это означает, что различные суда с разной степенью автономности будут функционировать в общем сценарии координации движения, образуя новый тип водной транспортной системы с неукоснительной реализацией условия обеспечения безопасного кибернетического состояния A-Navigation при снижении влияния человеческого фактора за счет внедрения систем искусственного интеллекта. Следовательно, автономное морское судно должно быть в полной мере осведомлено о ситуационной безопасности в режиме реального времени.

Представляется важным унифицировать структуру кибернетической осведомленности для реализации процесса осознания ситуации безопасности судовождения как восприятие, осмысление и поддержку принятия решения в практическом приложении в виде проекционного слоя *ситуационной осведомленности*. Как возможный способ достижения кибернетической осведомленности необходимо выделить интегрирование информации ситуационного восприятия в реальном времени, а также учет дополнительных знаний предметной области и данных разнородных датчиков для совершенствования архитектуры информирования о безопасности судовождения.

Дорожная карта кибернетической осведомленности является основным инструментом для выполнения задач уровня понимания осознанности ситуации, представляющей собой подход к достижению цели путем сопоставления информации, относящейся к ситуационной безопасности, формируемой из различных аспектов. Уровень восприятия ситуационной осведомленности включает следующие компоненты: статус судна, состояние оборудования, план маршрута, безопасное уклонение от препятствия, а также погодные условия. Обзор процесса осознания ситуационной безопасности в режиме реального времени дан на рис. 4 [27].

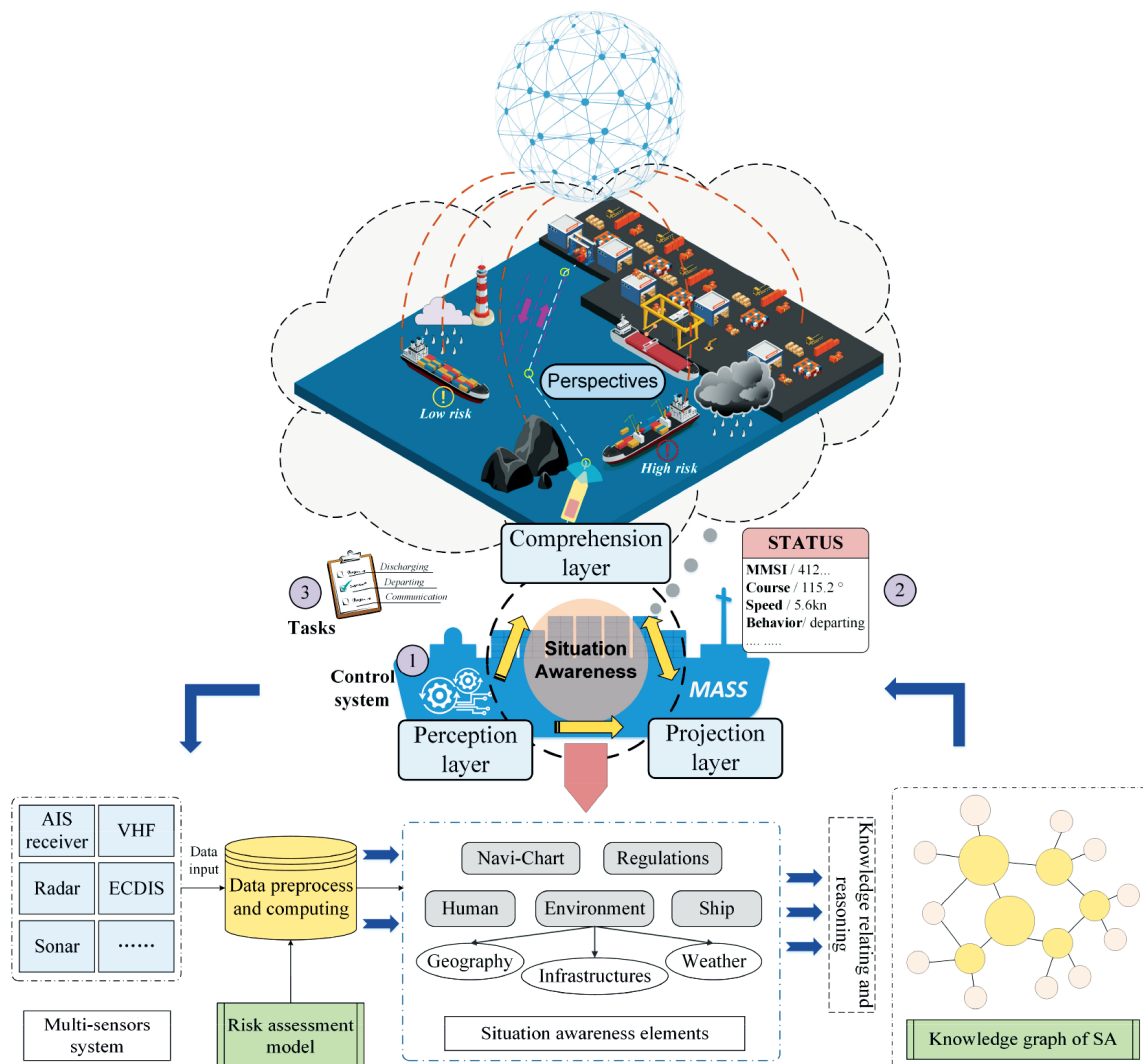


Рис. 4. Перспективная дорожная карта практического использования кибернетической ситуационной осведомленности в вопросах безопасности судовождения

Перспективная информация извлекается как на уровне понимания, включающем судно и оборудование, маршрут, воздействие событий и чрезвычайных ситуаций, так и на уровне проектирования, включающем трафик и метеорологическую информацию. Как статические, так и динамические данные, полученные с помощью мультисенсорной системы МАНС (в англ. варианте MASS — Maritime Autonomous Surface Ships), являются основой анализа ситуационной осведомленности на уровне восприятия осознания ситуации. Уровень осознания ситуации может достигаться МАНС при учете знания как на уровне восприятия, так и на уровне прогнозирования.

Три базовых уровня: понимание, восприятие, прогнозирование в рамках кибернетической онтологии формируют феномен ситуационной осведомленности как замкнутый цикл обмена информации, что отражено в центральной части рис. 4. Для эффективной организации семантического

объединения вводится *концепция онтологического инжиниринга* с представлением различных ситуационных сценариев реального мира. Процесс включает различные функции для создания структурного графа знаний.

Основная цель дорожной карты ситуационной осведомленности (в английском варианте Situation Awareness) заключается в организации структурного графа знаний, в котором должны быть представлены различные объекты и их взаимосвязи друг с другом. В частности, работа по созданию карты ситуационной осведомленности включает несколько аспектов: расчет взаимосвязи пространственной топологии, идентификацию конфликтов на основе оценки риска и обогащение навигационных условий. Локальная структурная сеть может быть создана с использованием различных источников информации путем установления взаимосвязи между каждым объектом. Сеть ситуационной осведомленности может быть сформирована путем соединения каждого класса объектов для формирования всей сети в целом с целью максимального соответствия каждому элементу ситуации. Таким образом, семантическая онтология фактически поддерживает формирование дорожной карты ситуационной осведомленности.

Данные вводятся в модуль обработки и вычислений для проведения дальнейшего анализа на основе моделей оценки риска для расчета взаимосвязи пространственной топологии проекционного слоя ситуационной осведомленности. Затем они извлекаются в различные категории знаний, которые связаны друг с другом отношениями в виде графика знаний. Наконец, всестороннее понимание ситуационной осведомленности может быть выражено с помощью графика знаний, использующего такие функции, как рассуждение и запрос. С целью достижения ситуационной осведомленности по ситуационной карте можно выделить следующие возможности на уровне понимания: общую ситуацию автономной навигации с оценкой состояния судна, работоспособность оборудования и безопасность маршрута, обогащение оценки навигационного риска, временные и динамические характеристики, знания предметной области для учета чрезвычайных ситуаций. Ситуационная осведомленность, по сути, рассматривается как динамичный процесс. Приобретение дополнительных знаний в предметной области позволяет быть в курсе ситуации (например, строгое соблюдение Международных правил предотвращения столкновений судов (МППСС) при правильном их истолковании).

Для полной осведомленности необходима *концентрация внимания на собственном судне* при игнорировании окружающих объектов в диапазоне взаимодействия. Моделирование дорожной карты ситуационной осведомленности с глобальной точки зрения признается непрактичным, поскольку нереалистичная осведомленность может быть сформирована при различии степеней автономности судна и типов судов. Поэтому элементы сценария осведомленности акцентируются на собственном МАНС с их подробным уточнением в виде представленных в пунктирной рамке пяти расширенных категорий, демонстрируемых на рис. 4 как элементы осведомленности о ситуации и трех категорий в окружении судна, отмеченных светло-фиолетовыми кругами с цифрами 1–3. Таким образом представлены три модуля собственного судна как инициатора осознания ситуации кибернетической осведомленности: 1 — контрольная система управления, 2 — статус судна и 3 — модуль задач. Система управления относится к модулю, который отвечает за проектирование маршрута, принятие решений и реализацию действий. В большинстве обычных случаев данный модуль осуществляет управление МАНС, в то время как в некоторых чрезвычайных ситуациях ответственность за управление передается бортовым операторам в центр дистанционного управления. Модуль состояния судна играет роль отображения характеристик МАНС, включая данные о движении и статические характеристики. Модуль задач отвечает за хранение информации о задачах в общепринятых категориях: навигационные данные, коммуникационные задачи, направленные на взаимодействие со службами на берегу или окружающими судами, и транспортная информация о типе груза и деталях рейса.

Для проверки осуществимости предложенной модели ситуационной осведомленности выбирается фаза движения МАНС из портовой акватории к причалу в качестве примера демонстрации работы модели. Предполагается, что необходимая информация, касающаяся ситуации, может быть получена из системы судовых датчиков. МАНС приближается к пирсу по запланированному маршруту. Как показано на рис. 4, на переходе намечены путевые точки планового изменения курса следования, которые

можно эффективно изменить с целью достижения оптимальной конфигурации целевого маршрута для безопасного уклонения от навигационного препятствия или расхождения с двумя выходящими из порта судами. Видимость для каждого судна в данной ситуации устанавливается таким образом, чтобы они были в поле зрения друг друга на протяжении всего процесса судовождения. В качестве навигационного препятствия имитируется скала, в то время как система разделения движения и маяк указаны для отображения общего антуража дорожной карты ситуационной осведомленности. Кроме того, информация о погоде также предоставляется для полноты ситуационной осведомленности в режиме реального времени. Для оценки состояния движения судов в рамках концепции ситуационной осведомленности разработаны специальные показатели, такие как *риск столкновения* и *навигационная сложность движения*. Многие из этих показателей основаны на парных столкновениях между судами без учета влияния третьих объектов. Однако механизм, позволяющий выйти за рамки парных столкновений, важен для управления морским движением.

Перспективным направлением признается система оценки ситуации с морским движением, которая рассматривает движение как целостный процесс, а не как взаимодействие пары судов [28]. Для эффективного решения вопроса используется теория сложных сетей, и морской трафик моделируется как виртуальная сеть, топологические свойства которой составляют вектор состояния, отражающий профиль ситуационной осведомленности движения морского транспорта. Окружающая среда как один из пяти элементов сценария осведомленности включает физические объекты, влияющие на навигационное состояние судов (см. рис. 4). В частности, данный элемент можно разделить на три категории: география, инфраструктура, погода. Под географическими атрибутами подразумеваются изначально существующие в природе объекты.

Инфраструктура относится к объектам, построенным искусственным образом для логистических целей. Также важно иметь точную информацию о погоде, которая тесно связана с безопасностью навигации посредством прогнозирования видимости. Автоматизированный процесс представляет собой движение судна, при котором пространственно-топологическая взаимосвязь между его траекторией и объектами окружающей среды остается постоянной при сохранении неизменной скорости или курса, т. е. когда изменяются характеристики скорости или курса судов или пространственно-топологическая взаимосвязь между их траекторией и объектами окружающей среды, текущая реализация процесса на основе искусственного интеллекта переходит к следующему этапу моделирования.

В отличие от деятельного следования судна по запланированному маршруту процессное синтезирование является продолжением деятельного движения, описывающего поведение взаимодействия, возникающее между программированием траектории за счет подъема карты с постоянством скорости и курса и объектами в географическом пространстве соответственно. Например, подготовку к постановке на якорь можно рассматривать как поведенческий процесс, который обычно сопровождается серией действий замедления, в то время как траектория сохраняет ту же пространственную топологическую связь с географическим объектом якорной стоянки во время этого процесса до тех пор, пока замедление не будет остановлено как фактор изменения активности морского подвижного объекта. Следовательно, процесс подготовки к постановке на якорь указывает на то, что на судне происходит реализация автоматизированного процесса, связь которого со следующим вариантом процесса осуществляется с помощью анализа судовой активности.

Начало постановки на якорь и акт фактической постановки на якорь, являются моментами, когда заканчивается подготовка к постановке на якорь и происходит процесс непосредственной постановки на якорь как осуществление момента синтезирования последующего процесса. Аналогично пространственная топологическая взаимосвязь между траекторией судна и изменением географического объекта означает, что судно выполняет определенную активность, указывающую на начало организации следующего этапа процесса. Сам процесс, как правило, имеет больший временной и пространственный диапазоны, чем фактическая активность, он демонстрирует, что судно выполняет определенную задачу (например, стоит на якоре) и активность транспортного средства

не меняется в течение этого периода. В отличие от активности математическая формализация процесса не учитывает изменение характеристик движения в виде скорости и курса. Акцент делается на изменение пространственного и топологического состояния между траекторией и окружающей средой.

Судовая активность, которую, в принципе, можно рассматривать как один из компонентов автоматизированного процесса, является условием триггерного феномена между различными процессами и служит для формирования окончания предыдущего процесса и начала следующего. Оценка событий в рамках текущего вида наблюдения, описывающих активность судна, синтезируется как макроскопическое движение относительно текущей контрольной цели в виде взаимосвязи логических и временных условий серии упорядоченных действий. Например, швартовку и снятие с якоря можно рассматривать как одно целостное событие, включающее три сценария процесса: ускорение для снятия с якоря, замедление для подготовки к швартовке и непосредственно швартовную операцию. Автономная маршрутизация судна может обозначать процесс, происходящий в широком временном и пространственном контексте. Например, следование судна из одного порта в другой рассматривается как единое однозначное событие, содержащее несколько сценариев: отправление из порта отхода, несколько последующих сегментарных событий маршрутизации и прибытие в порт назначения. Последовательность макроскопических событий представляет собой семантическую агрегацию действий и процессов со связанными отношениями, позволяющих от тривиальных траекторий перейти к многомасштабному пространственно-временному семантическому синтезу и реализовать многомерное моделирование программного следования судна по запланированному маршруту. На основе многомасштабного анализа можно с позиций онтологического инжиниринга выполнить когнитивное моделирование активности как процесса, что позволяет сформировать систематическую интерпретацию движения судна.

Сближающееся судно является одним из наиболее важных факторов источника риска столкновения, на который следует обращать пристальное внимание. Важно определить взаимосвязь, указанную в МППСС между собственным судном и окружающими потенциально опасными для расхождения судами. Следовательно, необходимо получить данные элементов движения потенциально опасных судов для расхождения, а также полную подробную информацию, необходимую для определения в целом ситуации опасности столкновения. Для этого необходимо интегрировать фактические данные других элементов, таких как окружающая среда и юридические нормативные акты. В этом случае мероприятия по предотвращению столкновений могут быть эффективно реализованы всеми участниками путем совместных действий.

В автоматизированной системе водного транспорта нельзя *игнорировать человеческий фактор*, который включает в себя не только мореплавателей, операторов службы управления движения судов, персонал поисково-спасательных центров, но и менеджеров судоходных компаний. Согласно анализу морских происшествий, в торговом флоте 75 % аварийных инцидентов вызвано ошибочными действиями судоводителя ввиду высокой когнитивной нагрузки вахтенного помощника независимо от наличия современных интеллектуальных технических средств на мостике судна [29].

Электронно-картографическая навигационная информационная система отображает не только объекты окружающей среды, но и виртуальные функциональные объекты. Электронная карта очень важна для того, чтобы судно могло безопасно следовать запланированным курсом и эффективно выполнять поставленные задачи. Для автономной навигации большая часть информации представляется как взаимодействие физических и виртуальных объектов, которые должны быть вычислены МАНС. Для полного понимания ситуации необходимо дополнительно преобразовать обозначенных участников фреймворка ситуационной осведомленности в вычисляемые объекты, пространственные отношения которых могут быть оптимальным образом спрогнозированы в соответствии с теорией пространственной топологии.

Дорожная карта практического использования кибернетической осведомленности (см. рис. 4) демонстрирует пример инновационного реалистичного понимания функционирования МАНС с безусловным условием необходимости интегрирования с концепцией *хорошей морской практики*.

Интеллектуальная идентификация судна в пространственно-временном континууме имеет решающее значение для контроля за безопасностью на водном транспорте при построении когнитивного ориентирования судна, где его оптимальное следование в различных семантических масштабах обеспечивается за счет использования определенных функций онтологии в различных сценариях последовательно от микроскопической до макроскопической перспектив [30].

На основе анализа многомасштабных характеристик судна, отраженных в траектории его движения, синтезированной благодаря логическому способу восприятия судоводителями сложного ситуационного поведения в комбинации с функционированием автоматизированной системы наблюдения, процесс безопасного следования подвижного объекта можно рассматривать как результат применения всеобъемлющего интеллектуального познания, реализованного из постулата осведомленности. Вследствие указанного факта становится реально возможным моделировать интерактивное маневрирование судна с учетом топологической и географической семантики для различных масштабов в когнитивной манере логического рассуждения человека на базе аксиом с ограниченными свойствами. Положительная оценка кибернетической осведомленности имеет принципиальное значение в ситуационном продвижении практического применения концепции A-Navigation.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование актуальности применения сплайнового эталона картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциала кибернетической ситуационной осведомленности позволяет сделать следующие выводы:

1. Аналитический обзор проблематики кибернетической осведомленности в судовождении показал, что сплайновый эталон картографирования целесообразен практически в качестве инновационного обеспечения корреляционно-экстремальной навигации как альтернативы спутникового позиционирования.
2. Анализ преимуществ применения технологии кибернетической осведомленности подтвердил возможность применения в судовождении постулатов ситуационной осведомленности с целью продвижения возможностей искусственного интеллекта для усиления концепции A-Navigation.
3. Изучение вопроса развития концепции кибернетической осведомленности в части дублирования спутниковых систем перспективными вариантами альтернативной навигации позволяет спрогнозировать принципиальную успешность решения проблемы локальной уязвимости глобальных средств позиционирования.
4. Сформирована точка зрения об эффективности применения гипотезы кибернетической осведомленности в качестве формализованной оценки риска в морской индустрии для информационной поддержки принятия решений.
5. Набор алгоритмов адаптирован под задачу корреляционно-экстремальной навигации сплайн-функций с целью моделирования эталона информативности как постулата кибернетической осведомленности.
6. Апробирована модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче оптимизации компьютерной трехмерной визуализации картографического эталона КЭНС на основе использования гибридного алгоритма двумерной аппроксимации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaskova D. Cyber Threat Risk Assessment in Energy Based on Cyber Situational Awareness Techniques / D. Gaskova, E. Galperova, A. Massel // Information Systems and Design: Second International Conference, ICID 2021, Virtual Event, September 6–7, 2021, Revised Selected Papers. — Cham: Springer International Publishing, 2022. — Pp. 134–145. DOI: 10.1007/978-3-030-95494-9_11.
2. Insaurralde C. C. Ontologies to Support Space Traffic Management Awareness / C. C. Insaurralde, E. Blash // 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). — IEEE, 2022. — Pp. 1–10. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843812.

3. *Массель А. Г.* Онтологический инжиниринг для разработки интеллектуальной системы анализа угроз и оценки рисков кибербезопасности энергетических объектов / А. Г. Массель, Д. А. Гаськова // Онтология проектирования. — 2019. — Т. 9. — № 2 (32). — С. 225–238. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-225-238.
4. *Гаськова Д. А.* Методы, модели и комплекс программ анализа киберситуационной осведомленности энергетических объектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Гаськова. — Иркутск, 2021. — 24 с.
5. *Гаськова Д. А.* Методики анализа киберситуационной осведомленности об энергетическом объекте / Д. А. Гаськова, А. Г. Массель // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. — 2021. — Т. 19. — № 2. С. 17–28. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-2-17-28.
6. *Endsley M. R.* Situation awareness / M. R. Endsley // Handbook of human factors and ergonomics. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. — Pp. 434–455. DOI: 10.1002/9781119636113.ch17.
7. *Endsley M. R.* Situation awareness global assessment technique (SAGAT) / M. R. Endsley // Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference. — IEEE, 1988. — Pp. 789–795. DOI: 10.1109/NAECON.1988.195097.
8. *Гаськова Д. А.* Метод определения уровня киберситуационной осведомленности энергетических объектов / Д. А. Гаськова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2020. — № 4 (20). — С. 64–74. DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.006.
9. *Blash E.* Cyber Awareness Trends in Avionics / E. Blash, R. Sabatini, A. Roy, K. A. Kramer, G. Andrew, G. T. Schmidt, C. C. Insaurralde, G. Fasano // 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). — IEEE, 2019. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/DASC43569.2019.9081646.
10. *Bracken B.* Can Situation Awareness Be Measured Physiologically? / B. Bracken, S. Tobynе, A. Winder, N. Shamsi, M. R. Endsley // Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering: Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Neuroergonomics and Cognitive Engineering, Industrial Cognitive Ergonomics and Engineering Psychology, and Cognitive Computing and Internet of Things, July 25–29, 2021, USA. — Springer International Publishing, 2021. — Pp. 31–38. DOI: 10.1007/978-3-030-80285-1_4.
11. *Gaskova D. A.* Modeling scenarios of extreme situations in the energy sector caused by cyber threats / D. A. Gaskova, A. G. Massel // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 289. — Pp. 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/202128903005.
12. *Chiou E. K.* Towards Human-Robot Teaming: Tradeoffs of Explanation-Based Communication Strategies in a Virtual Search and Rescue Task / E. K. Chiou, M. Demir, V. Buchanan, C. C. Coral, M. R. Endsley, G. J. Lematta, N. J. Cooke, N. J. McNeese // International Journal of Social Robotics. — 2022. — Vol. 14. — Pp. 1117–1136. DOI: 10.1007/s12369-021-00834-1.
13. *Ююкин И. В.* Кибернетическая безопасность альтернативной автономной навигации с позиций сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
14. *Insaurralde C. C.* Ontology-Based Situation Awareness for Air and Space Traffic Management / C. C. Insaurralde, E. Blash, R. Sabatini // 2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC). — IEEE, 2022. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/DASC55683.2022.9925810.
15. *Ююкин И. В.* Навигационное использование e-Logan в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
16. *Blash E.* Space Track Ontology elements for Space Domain Awareness / E. Blash, G. Chen, D. Shen, C. C. Insaurralde, K. Pham // Sensors and Systems for Space Applications XV. — SPIE, 2022. — Vol. 12121 — Pp. 98–107. DOI: 10.1117/12.2619580.
17. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
18. *Endsley M. R.* The Divergence of Objective and Subjective Situation Awareness: A Meta-Analysis / M. R. Endsley // Journal of cognitive engineering and decision making. — 2020. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 34–53. DOI: 10.1177/1555343419874248.
19. *Endsley M. R.* A Systematic Review and Meta-Analysis of Direct Objective Measures of Situation Awareness: A Comparison of SAGAT and SPAM / M. R. Endsley // Human Factors. — 2021. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 124–150. DOI: 10.1177/0018720819875376.

20. Gaskova D. Intelligent System for Risk Identification of Cybersecurity Violations in Energy Facility / D. Gaskova, A. Massel // 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482229.

21. Гаськова Д. А. Технология анализа киберугроз и оценка рисков нарушения кибербезопасности критической инфраструктуры / Д. А. Гаськова, А. Г. Массель // Вопросы кибербезопасности. — 2019. — № 2 (30). — С. 42–49. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-2-42-49.

22. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.

23. Ююкин И. В. Сплайновая модель оперирования гридированными данными как принцип электронного картографирования топографии морского дна / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.

24. Ююкин И. В. Применение сплайновых интерполирующих функций в парадигме универсального стандарта обмена цифровыми гидрографическими данными / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 875–890. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-875-890.

25. Canciani A. J. Magnetic Navigation on an F-16 Aircraft Using Online Calibration / A. J. Canciani // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System. — 2022. — Vol. 58. — Is. 1. — Pp. 420–434. DOI: 10.1109/TAES.2021.3101567.

26. Ююкин И. В. Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.

27. Song R. Constructed Knowledge Maps for Situation Awareness of Maritime Autonomous Surface Ships / R. Song, E. Papadimitriou, R. R. Negenborn, P. van Gelder // Proceedings of the International Ship Control Systems Symposium. — 2022. — Vol. 16. — Pp. 21. DOI: 10.24868/10722.

28. Sui Z. Marine traffic profile for enhancing situational awareness based on complex network theory / Z. Sui, Y. Huang, Y. Wen, C. Zhou, X. Huang // Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 241. — Pp. 110049. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110049.

29. Zagar D. Human Factor in Navigation Overview of Cognitive Load Measurement during Simulated Navigational Tasks / D. Zagar, M. Svetina, A. Kosir, F. Dimc // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 10. — Pp. 775. DOI: 10.3390/jmse8100775.

30. Song R. Semantic Modeling of Ship Behavior in Cognitive Space / R. Song, Y. Wen, W. Tao, Q. Zhang, E. Papadimitriou, P. van Gelder // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10. — Is. 10. — Pp. 1347. DOI: 10.3390/jmse10101347.

REFERENCES

1. Gaskova, Daria, Elena Galperova, and Aleksei Massel. “Cyber Threat Risk Assessment in Energy Based on Cyber Situational Awareness Techniques.” *Information Systems and Design: Second International Conference, ICID 2021, Virtual Event, September 6–7, 2021, Revised Selected Papers*. Cham: Springer International Publishing, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-95494-9_11.

2. Insaurralde, Carlos C., and Erik Blash. “Ontologies to Support Space Traffic Management Awareness.” *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843812.

3. Massel, A.G., and D. A. Gaskova. “Ontological engineering for the development of the intelligent system for threats analysis and risk assessment of cybersecurity in energy facilities.” *Ontology of Designing* 9.2(32) (2019): 225–238. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-225-238.

4. Gaskova, Daria A. Metody, modeli i kompleks programm analiza kibersituatsionnoy osvedomlennosti energeticheskikh obektov. Abstract of PhD diss. Irkutsk, 2021.

5. Gaskova, D.A., and A. G. Massel. “The Method of Cyber Awareness Analysis of an Energy Facility.” *Vestnik NSU. Series: Information Technologies* 19.2 (2021): 17–28. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-2-17-28.

6. Endsley, Mica R. “Situation awareness.” *Handbook of human factors and ergonomics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. 434–455. DOI: 10.1002/9781119636113.ch17.

7. Endsley, Mica R. "Situation awareness global assessment technique (SAGAT)." *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference*. IEEE, 1988. DOI: 10.1109/NAECON.1988.195097.
8. Gaskova, Daria A. "Method for determining the level of cyber situational awareness on energy facilities." *Information and mathematical technologies in science and management* 4(20) (2020): 64–74. DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.006.
9. Blash, Erik, Roberto Sabatini, Alope Roy, Kathleen A. Kramer, George Andrew, George T. Schmidt, Carlos C. Insaurralde, and Giancarmine Fasano. "Cyber Awareness Trends in Avionics." *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/DASC43569.2019.9081646.
10. Bracken, Bethany, Sean Tobbyne, Aaron Winder, Nina Shamsi, and Mica R. Endsley. "Can Situation Awareness Be Measured Physiologically?" *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering: Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Neuroergonomics and Cognitive Engineering, Industrial Cognitive Ergonomics and Engineering Psychology, and Cognitive Computing and Internet of Things, July 25–29, 2021, USA*. Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-95494-9_11.
11. Gaskova, Daria A., and Aleksei G. Massel. "Modeling scenarios of extreme situations in the energy sector caused by cyber threats." *E3S Web of Conferences*. Vol. 289. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128903005.
12. Chiou, Erin K., Mustafa Demir, Verica Buchanan, Christopher C. Coral, Mica R. Endsley, Glenn J. Lematta, Nancy J. Cooke, and Nathan J. McNeese. "Towards Human-Robot Teaming: Tradeoffs of Explanation-Based Communication Strategies in a Virtual Search and Rescue Task." *International Journal of Social Robotics* 14 (2022): 1117–1136. DOI: 10.1007/s12369-021-00834-1.
13. Yuyukin, Igor V. "Cybernetic security of alternative offline navigation from the standpoint of spline technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
14. Insaurralde, Carlos C., Erik Blash, and Roberto Sabatini. "Ontology-Based Situation Awareness for Air and Space Traffic Management." *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/DASC55683.2022.9925810.
15. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
16. Blash, Erik, Genshe Chen, Dan Shen, Carlos C. Insaurralde, and Khanh Pham. "Space Track Ontology elements for Space Domain Awareness." *Sensors and Systems for Space Applications XV*. Vol. 12121. SPIE, 2022. DOI: 10.1117/12.2619580.
17. Yuyukin, Igor V. "Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
18. Endsley, Mica R. "The Divergence of Objective and Subjective Situation Awareness: A Meta-Analysis." *Journal of cognitive engineering and decision making* 14.1 (2020): 34–53. DOI: 10.1177/1555343419874248.
19. Endsley, Mica R. "A Systematic Review and Meta-Analysis of Direct Objective Measures of Situation Awareness: A Comparison of SAGAT and SPAM." *Human Factors* 63.1 (2021): 124–150. DOI: 10.1177/0018720819875376.
20. Gaskova, Daria, and Aleksei Massel. "Intelligent System for Risk Identification of Cybersecurity Violations in Energy Facility." *2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482229.
21. Gaskova, Daria, and Aleksei Massel. "The technology of cyber threat analysis and risk assessment of cybersecurity violation of critical infrastructure." *Cybersecurity issues* 2(30) (2019): 42–49. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-2-42-49.
22. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
23. Yuyukin, Igor V. "Spline model of gridded data operation as a principle of electronic mapping seabed topography." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.
24. Yuyukin, Igor V. "Application of spline interpolating functions in the paradigm of the universal standard exchange of digital hydrographic data." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 875–890. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-875-890.

25. Canciani, Aaron J. “Magnetic Navigation on an F-16 Aircraft Using Online Calibration.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* 58.1 (2022): 420–434. DOI: 10.1109/TAES.2021.3101567.
26. Yuyukin, Igor V. “Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
27. Song, Rongxin, Eleonora Papadimitriou, Rudy R. Negenborn, and Pieter van Gelder “Constructed Knowledge Maps for Situation Awareness of Maritime Autonomous Surface Ships.” *Proceedings of the International Ship Control Systems Symposium*. Vol. 16. 2022. DOI: 10.24868/10722.
28. Sui, Zhongyi, Yamin Huang, Yuanqiao Wen, Chunhui Zhou, and Xi Huang “Marine traffic profile for enhancing situational awareness based on complex network theory.” *Ocean Engineering* 241 (2021): 110049. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110049.
29. Zagar, Dejan, Matija Svetina, Andrej Kosir, and Franc Dimc. “Human Factor in Navigation Overview of Cognitive Load Measurement during Simulated Navigational Tasks.” *Journal of Marine Science and Engineering* 8.10 (2020): 775. DOI: 10.3390/jmse8100775.
30. Song, Rongxin, Yuanqiao Wen, Wei Tao, Qi Zhang, Eleonora Papadimitriou, and Pieter van Gelder “Semantic Modeling of Ship Behavior in Cognitive Space.” *Journal of Marine Science and Engineering* 10.10 (2022): 1347. DOI: 10.3390/jmse10101347.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.
Received: February 28, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-393-400

RESEARCH OF THE LOGISTICS SPHERE FOR COMBINED CARGOES DELIVERY BY THE ANALYTICAL METHODS

O. A. Izotov

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

In the article, on the example of planning and organizing container transportation of combined cargoes along the internal transport routes of Russia, a mathematical model and methodology for studying the logistics sphere of the processes under consideration are reviewed. The logistics of combined cargoes transportation can be represented as a continuous supply chain that does not have a material expression by itself, but forms some independent transport system that ensures the physical promotion of material flows and goods. Thus, the need for logistics is dictated by the necessity for a rational solution to a number of logistics tasks related to transportation. At the same time, the transport packaging of small consignments, which meets the principles of integrity and consistency of the process under consideration, not only dictates the forms and methods of attracting modes of transport to transportation, but also largely affects the theology of transportation and transshipment applied to such cargoes, and therefore the choice of the cargo delivery route. The specifics of such goods delivery to the consumer is that small shipments at one stage of transportation often lose the advantages inherent in container theologies due to the need for timely return of linear containers to the sea terminal. At the same time, there is a need for additional transshipment operations that ensure the transfer of batches of goods from one mode of transport to another, as well as the transportation of goods in enlarged cargo spaces formed on pallets together with other people's cargo and a number of other independent factors. The described model considers the functioning of an unmanaged logistics environment, which is characterized by a significant set of random parameters. In such an environment, using an unpredictable number of transshipment and transportation technologies, the whole set of quantitative and qualitative indicators describing its activities is proposed to be expressed in points form.

Keywords: combined cargo, container technologies, logistics system, mathematical model.

For citation:

Izotov, Oleg A. "Research of the logistics sphere for combined cargoes delivery by the analytical methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 393–400. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-393-400.

УДК 656.073.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ДОСТАВКИ СБОРНЫХ ГРУЗОВ АНАЛИТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

О. А. Изотов

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

В статье на примере планирования и организации контейнерных перевозок сборных грузов по внутренним транспортным маршрутам России рассмотрены математическая модель и методика исследования логистической сферы рассматриваемых процессов. Логистика транспортировки сборных грузов может быть представлена в виде непрерывной цепи поставки, не имеющей сама по себе материального выражения, но формирующей некоторую независимую транспортную систему, обеспечивающую физическое продвижение материальных потоков и товаров. Таким образом, потребность в логистике продиктована необходимостью рационального решения целого ряда связанных с перевозкой логистических задач. При этом транспортная упаковка малых партий грузов, отвечающая принципам целостности и системности рассматриваемого процесса, не только обуславливает формы и методы привлечения видов транспорта к перевозке, но и во многом влияет на применяемые к таким грузам технологии перевозки и перегрузки, а значит, и на выбор маршрута доставки груза. Специфика доставки таких товаров до потребителя состоит в том, что малые партии грузов на одном из этапов транспортировки нередко теряют преимущества, присущие контейнерным

технологиям в силу необходимости своевременного возвращения линейных контейнеров на морской терминал. При этом возникает необходимость в дополнительных перегрузочных операциях, обеспечивающих передачу партий товаров с одного вида транспорта на другой, а также транспортировку товаров в укрупненных грузовых местах, сформированных на паллетах совместно с чужими грузами, а также ряд других независимых факторов. Описанная модель рассматривает функционирование неуправляемой логистической среды, которая характеризуется совокупностью случайных параметров. В такой среде, использующей непредсказуемое количество перегрузочных и перевозочных технологий, все множество описывающих ее деятельность количественных и качественных показателей, предложено выразить в балльной форме.

Ключевые слова: сборные грузы, контейнерные технологии, логистическая система, математическая модель.

Для цитирования:

Изотов О. А. Исследование логистической сферы доставки сборных грузов аналитическими методами / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 393–400. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-393-400.

Введение (Introduction)

Логистика транспортировки сборных грузов может быть представлена как непрерывная цепь поставки, формирующая некоторую независимую транспортную систему, обеспечивающую физическое продвижение материальных потоков и товаров. Таким образом, потребность в логистике обусловлена необходимостью рационального решения ряда связанных с перевозкой логистических задач [1]. При этом транспортная упаковка малых партий грузов, отвечающая принципам целостности и системности рассматриваемого процесса, не только определяет формы и методы привлечения видов транспорта к перевозке, но и во многом оказывает влияние на применяемые к таким грузам технологии перевозки и перегрузки, а значит, и на выбор маршрута доставки грузов [2].

Сборные партии грузов представляют собой товары дорогостоящей номенклатуры: комплектующие для производства сложной электронной аппаратуры, запчасти для машин и станков и т. д., на долю которых приходится 10–12 % грузов, перевозимых в контейнерах, они могут достигать до 40–60 % от стоимости перевозимых товаров [3]. Специфика доставки таких товаров до потребителя состоит в том, что малые партии грузов на одном из этапов транспортировки нередко теряют преимущества, присущие контейнерным технологиям в силу необходимости своевременного возвращения линейных контейнеров на морской терминал, а значит, появления дополнительных перегрузочных операций, связанных с передачей товаров с одного вида транспорта на другой, транспортировкой товаров в укрупненных грузовых местах, сформированных на паллетах совместно с чужими грузами, и т. п. [4]. Организаторы доставки малых партий грузов вынуждены тщательно разрабатывать схему перевозки, а также весь спектр сопутствующих услуг и перевозчиков, отвечающих требованиям клиента.

В настоящее время на внутренних магистральных путях сообщения доставка сборных партий грузов до получателя может быть организована с использованием следующих основных вариантов:

- в большегрузных контейнерах морских линий в сроки их свободного использования (как правило, не более 8 сут.);
- в большегрузных контейнерах морских линий с последующей перегрузкой укрупненных грузовых мест на смежные виды транспорта;
- в укрупненных грузовых местах.

Последние два варианта предполагают обработку грузов без участия грузоотправителя и грузополучателя, предварительное накопления партий грузов для совместной отправки по назначению из промежуточного пункта перевалки и т. д. Каждая из разработанных технологий транспортировки на определенном этапе охватывает тот или иной вид транспорта. Так, логистика перевозок предполагает, что доставку товаров на расстояния, превышающие 1500 км, целесообразно осуществлять железнодорожным транспортом, на более короткие расстояния — автомобильным. Размещение

и производственные мощности различного рода предприятий на территории Российской Федерации требуют организации скоростных контейнерных поездов, обеспечивающих транзит грузов между портами, расположенными на западе и востоке страны, но не дающих возможность подключения к данной контейнерной технологии перевозок внутренних регионов в силу того, что малые партии грузов по-прежнему не довозятся до получателя в контейнерах. Кроме того, количество и периодичность отправок контейнерных поездов доказывают, что логистический потенциал для доставки грузов является недостаточным [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для решения рассматриваемой в работе проблемы существует несколько подходов, а именно: наращивание регулярности использования или увеличение грузоподъемности подвижного состава и средств транспортировки, увеличение сроков свободного пользования контейнерами на внутренних магистралях страны или предложение инновационной технологии, повышающей уровень качества логистической сферы доставки грузов.

Расчеты потребности в подвижном составе обусловлены потребностями отраслей промышленности с учетом потенциала грузовой базы регионов и возможностей существующей транспортной инфраструктуры по пропуску заявленных объемов. Увеличение сроков свободного пользования морскими контейнерами несет дополнительные издержки по их аренде, что особенно невыгодно при транспортировке малой партии грузов. Все указанные факторы отрицательно влияют на развитие рынка транспортных услуг для доставки сборных грузов в регионы с малой их потребностью.

Анализ научных трудов и факторов практической деятельности транспортного рынка показывают, что в качестве инновационной технологии может быть предложен новый тип контейнера, а именно *внутриконтейнерный малотоннажный модуль*, отвечающий требованиям современных контейнерных технологий, призванный возродить на территории страны систему транспортировки грузов 3-х, 5-ти и 10-тонных контейнеров [6]¹. Такой модуль, после выгрузки его из большегрузного контейнера, может быть доставлен до грузополучателя с применением всех контейнерных преимуществ, не задерживая при этом грузы морской линии. Проблема состоит в том, как оценить качественные изменения, которые неизбежно последуют после внедрения перспективной инновации в рынок транспортных услуг. SWOT-анализ² указанных ранее компонентов рынка транспортных услуг по доставке сборных партий грузов позволяет сделать некоторые предварительные выводы:

- применяемые при организации перевозки грузов технологии часто независимы друг от друга;
- технология перевозки грузов, как правило, разрабатывается некоторым независимым субъектом транспортного рынка (экспедитором, грузовладельцем и т. п.), что способствует формированию некоторой независимой транспортной системы, отвечающей запросам организатора самого процесса;
- субъекты рынка услуг на видах транспорта разобщены в силу реализации различных целей и задач, объединить их может на определенном этапе только общий интерес в попутной доставке грузов;
- параметры (количественные и качественные показатели) функционирования транспортных систем не совпадают;
- совокупность независимых транспортных систем неуправляема как единая система, более того, такие транспортные системы, как правило, между собой находятся в конкурентных отношениях.

Результаты (Results)

Очевидно, что совокупность независимых транспортных систем нельзя рассматривать как единую систему, она может быть рассмотрена как среда, которую можно назвать *логистической*. Найдем целевую функцию выделенной логистической среды с учетом ее вида деятельности. В данном

¹ Патент на полезную модель № 207180 «Складной грузовой контейнер».

² SWOT-анализ — метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды.

случае целевой функцией логистической среды можно считать доставку сборных партий грузов во внутренние регионы страны с морского контейнерного терминала. Тогда под логистической далее будем понимать некоторую транспортную среду, осуществляющую логистический, ориентированный по доставке малой партии грузов вид деятельности, обладающей для этого совокупностью соответствующих функциональных признаков и способной удовлетворить потребности грузовладельца в востребованных услугах на конкурентной основе.

Поскольку такая логистическая среда строится на основе применяемых в ходе перевозки грузов технологий, каждая из которых имеет и реализует свой набор функций, необходимо учитывать все необходимые количественные и качественные показатели на всех этапах транспортировки грузов. Научная литература, в которой выполнено описание методики оценки качества обслуживания в логистической системе [7], [8], подтверждает, что применение указанных показателей на практике значительно усложнено. При этом, как отмечалось ранее, параметры, характеризующие формируемую логистическую среду, носят случайный характер и, следовательно, их можно рассматривать как *случайные величины*, т. е. величины, показатели которых в ходе перевозки неизвестны до ее окончания. На основе этого специалистами Московского института инженеров транспорта была предложена *методика исследования неуправляемой логистической среды* [9].

Примерами случайной величины при перевозке сборной партии грузов могут служить количество перегрузок в ходе перевозки, суммарное расстояние перевозки, сроки завершения перевозки, стоимость и другие показатели. Таким образом, методика исследования факторов неуправляемой логистической среды может быть разработана на базе статистического анализа и обработки наблюдений [7] теории вероятностей и математической статистики. Отсюда за ожидаемые количественные и качественные параметры формируемой логистической среды могут быть приняты *математическое ожидание* и *дисперсия совокупности составляющих ее характеристик* (сравнение дисперсий и их средних значений) [10]. При этом предварительно каждая из этих характеристик должна быть представлена некоторым набором балльных оценок.

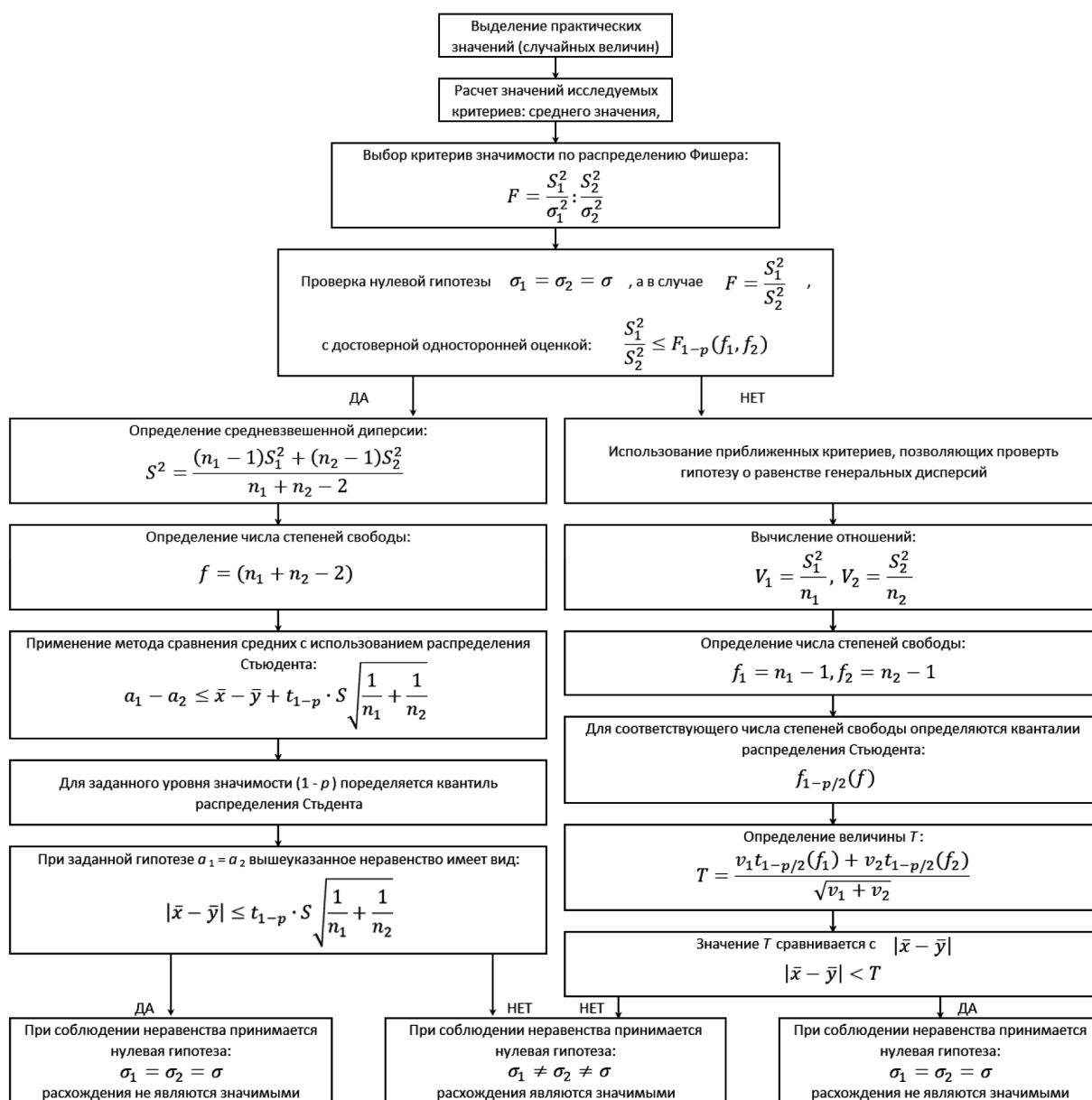
Оценка результатов функционирования любой системы, в том числе характеризующейся набором случайных величин, требует сравнения двух или более выборочных дисперсий. При этом возникает вопрос о допустимости сравнения выборочных дисперсий оценками одной и той же генеральной дисперсии, поскольку в данном случае рассматривается нулевая гипотеза¹ о равенстве дисперсий, опровержение которой требует доказательства значимого расхождения между S_1^2 и S_2^2 при выбранном уровне значимости p . В качестве критерия значимости может быть использовано распределение Фишера [10], [11]. Если нулевая гипотеза подтверждается, то после применения методики на основании распределений Стьюдента выполняется доказательство нулевой гипотезы в отношении выборочных средних значений в виде приведенной блок-схемы.

Апробация приведенных изучающей и описывающей методик может быть выполнена на основе трех указанных ранее вариантов перевозки малых партий грузов на базе формируемой логистической среды. Для оценки технологий следует использовать двадцать пять основных показателей: стоимость перевозки; перевозка грузов на расстояние до 500 км, до 1000 км, до 1500 км, до 2000 км, до 3000 км, до 5000 км, свыше 5000 км; доставка «до двери»; сохранность товара; надежность транспорта; наличие интермодальных возможностей; страхование груза; надежность перевозчика; доставка «точно в срок»; безопасность перевозки; связь перевозчика с клиентурой; взаимодействие с морским терминалом; доставка в районы Крайнего Севера; состояние инфраструктуры; информационное сопровождение груза; контроль в ходе перевозки; возможность обратной загрузки контейнера, модуля, транспорта; взаимодействие с перевозчиком; срок окончания перевозки.

Экспертным путем присвоим каждому показателю балл от 0 до 10. Это позволит отразить в расчетах все множество параметров, оценивающих логистическую среду в целом и получить совокупность характеристик самих параметров. В данном случае каждая такая совокупность представляет собой четыре случайных величины, которые можно исследовать как каждую в отдельности,

¹ Нулевая гипотеза — принимаемое по умолчанию предположение о том, что связи между двумя наблюдаемыми событиями, феноменами не существует.

так и в сравнении между собой, а также по отношению к логистической среде в целом. Безусловно, балльные оценки отражают субъективный характер, но такая необъективность может быть нивелирована увеличением количества оцениваемых факторов и независимостью анализа исследуемых процессов. При этом объективность оценки может быть повышена за счет включения в состав логистической среды всех возможных перевозочных технологий, как широко используемых, так и инновационных для доставки сборных партий грузов.



Блок-схема сравнительной оценки параметров логистической среды, сформированной для доставки сборных партий грузов

При использовании распределений Фишера и Стьюдента необходимо учитывать степени свободы, в соответствии с которыми определены статистические параметры. Пусть в рассматриваемой логистической среде число степеней свободы соответствует общему числу факторов (100), а статистические параметры каждой технологии перевозки имеют по 25 факторов. Тогда логистическая среда (ЛС), опирающаяся на две перевозочные технологии (сначала, железнодорожным транспортом, затем автомобильным транспортом) исследуется уже по 50 факторам. Полученные статистические параметры случайных величин для логистической среды по каждой технологии перевозок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические параметры логистической среды перевозки сборных грузов

Технологии перевозок рассматриваемой ЛС	Статистические параметры ЛС			
	$X_{\text{ср}}$	S	V	Число степеней свободы f
ЛС-1: 1-я технология перевозок	5,9	3,72	0,63	25
ЛС-2: 2-я технология перевозок	6,4	3,58	0,56	50
ЛС-3: 3-я технология перевозок	7,6	3,12	0,41	75

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что указанные три логистические среды представляют собой одну выборку, и, соответственно, различия между полученными средними значениями носят случайный характер. Таким образом, сформированная для транспортировки сборных партий грузов логистическая среда является однородной. Пример того, как изменится поведение логистической среды после внедрения инновационной технологии, показан в табл. 2.

Таблица 2

Статистические параметры новой логистической среды перевозки сборных грузов

Технологии перевозок рассматриваемой ЛС	Статистические параметры ЛС			
	$X_{\text{ср}}$	S	V	Число степеней свободы f
ЛС-4: 4-я технология перевозок	7,95	2,88	0,36	100

Сравнительная оценка требует применения блок-схемы, приведенной на с. 397, так как позволяет выполнить попарно сравнительную оценку четырех случайных величин: первая (ЛС-1) характеризует логистическую среду на основе перевозки сборных партий грузов в большегрузных контейнерах, вторая (ЛС-2) — на основе транспортировки сборных партий грузов в контейнерах с последующим дозавозом в укрупненных грузовых местах, третья (ЛС-3) — на основе перевозки в виде укрупненных грузовых мест, четвертая (ЛС-4) — новая логистическая среда, предусматривающая применение новых малотоннажных внутриконтейнерных модулей. Пример сравнения рассматриваемых технологий перевозок сборных грузов приведен в табл. 3.

Таблица 3

Статистические параметры инновационной логистической среды перевозки сборных грузов

Варианты сравнения	Принятая достоверность $1 - p$	Число степеней свободы f_1 / f_2	Отношение S^2_1 / S^2_2	Критерий Фишера F	Средне-взвешенная дисперсия S	t -критерий Стьюдента	Отклонения $(X_2 - X_1)$	Сравнение значений с распределением Стьюдента	Выполнение нулевой гипотезы
ЛС-1 и ЛС-4	0,95	25/100	1,29	1,6	3,27	1,66	1,83	$1,83 > 1,29$	Не выполнена
ЛС-2 и ЛС-4	0,95	50/100	1,24	1,6	3,36	1,66	1,59	$1,59 > 1,24$	Не выполнена

Таким образом, на основе проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что нулевая гипотеза не выполняется, т. е. расхождения случайных величин являются значительными.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Интеграция новой технологии перевозки сборных грузов с применением внутриконтейнерных модулей в контейнерные технологии способна оказать существенное влияние на сформировавшуюся логистическую среду доставки товаров в региональные центры их потребления, а использование малотоннажных внутриконтейнерных модулей представляет собой инновационный компонент логистической среды [12]–[14].

2. Очевидная целесообразность внедрения новой технологии перевозки сборных грузов, с одной стороны, подтверждает адекватность предложенной модели, всесторонне вписывающейся в понятие «логистическая среда», а с другой стороны, не исключает использование методов исследования протекающих процессов с опорой на свойства случайных величин [15]–[17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыбская В. В. Логистика: учебник / В. В. Дыбская [и др.]; под ред. В. И. Сергеева. — М.: Эксмо, 2009. — 944 с.
2. Изотов О. А. Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, Д. Л. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.
3. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: моногр. / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.
4. Изотов О. А. Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
5. Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.
6. Изотов О. А. Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, А. В. Гулятьев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 130–133.
7. Модели и методы теории логистики: учеб. пособие / Под ред. В. С. Лукинского. — СПб.: Питер, 2008. — 448 с.
8. Крохин Л. С. Экономико-математические методы в оперативном управлении на транспорте / Л. С. Крохин. — М.: ВИНТИ РАН, 2009. — 280 с.
9. Нечаева М. А. Аналитические методы исследования логистической сферы доставки груза (легковых автомобилей) / М. А. Нечаева, Л. Н. Матюшин // Логистика. — 2014. — № 10 (95). — С. 59–64.
10. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М.: Наука, 1968. — 288 с.
11. Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Воениздат, 1970. — С. 262–265.
12. Изотов О. А. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 1. — С. 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.
13. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
14. Морис У. Т. Наука об управлении. Байесовский подход / У. Т. Морис. — М.: Изд-во «Мир», 1971. — 304 с.
15. Irannezhad E. A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time / E. Irannezhad, C. Prato, M. Hickman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2019. — Vol. 121. — Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
16. Saeed N. Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines / N. Saeed, O. I. Larsen // Case Studies on Transport Policy. — 2016. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.
17. Lv B. Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // Computers & Industrial Engineering. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

REFERENCES

1. Dybskaya, V. V., E. I. Zaitsev, V. I. Sergeev, and A. N. Sterligova. *Logistika*. Edited by V. I. Sergeev. M.: Eksmo, 2009.

2. Izotov, Oleg Albertovich, Alexander Lvovich Kuznetsov, and Dmitriy Lvovich Golovtsov. "Role of transport and logistics clusters in creating container corridors for groupage cargo transportation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2020): 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.
3. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. A. Davydenko. *Morskaya konteynernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
4. Izotov, Oleg A., Aleksandr V. Kirichenko, and Aleksandr L. Kuznetsov. "Technological solutions for cargoes shipment through the container transport and technological systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
5. Izotov, Oleg A., Yuri I. Vasiliev, and Oleg A. Razhev. "Processes for forming groupage container consignments." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.
6. Izotov, O., A. Kuznetsov, and A. Gulyaev. "The prospects for freight forwarding container shipping." *Transport business of Russia* 4 (2019): 130–133.
7. Lukinskii, V. S. *Modeli i metody teorii logistiki*. SPb: Piter. 2008.
8. Krokhin, L. S. *Ekonomiko-matematicheskie metody v operativnom upravlenii na transporte*. M.: VINITI RAN, 2009.
9. Nechaeva, Margarita, and Lev Matyushin. "Analytical methods for investigating the logistics scope of cargo delivery (cars)." *Logistics* 10(95) (2014): 59–64.
10. Pustyl'nik, E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudenii*. M.: Nauka, 1968.
11. *Spravochnik po veroyatnostnym raschetam*. M.: Voenizdat, 1970. 262–265.
12. Izotov, Oleg Albertovich, and Alexander Lvovich Kuznetsov. "Development prospects of technologies of grouped cargo containerization." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2020): 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.
13. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
14. Moris, U. T. *Nauka ob upravlenii. Baiesovskii podkhod*. M.: Izdatel'stvo «Mir», 1971.
15. Irannezhad, Elnaz, Carlo Prato, and Mark Hickman. "A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 121 (2019): 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
16. Saeed, Naima, and Odd I. Larsen. "Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines." *Case Studies on Transport Policy* 4.2 (2016): 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.
17. Lv, Bowen, Bin Yang, Xiaolin Zhu, and Jun Li. "Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport." *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2023 г.
Received: February 16, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415

PLANNING AND CONTROL OF THE SHIP CURVILINEAR ROUTE

A. S. Vas'kov¹, A. A. Mironenko²

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

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

The possibility of applying the traditional navigation parameters used in pilotage (bearing and distance), as well as their sum and difference for planning and controlling the ship curvilinear route in coastal waters is being investigated. Mathematical apparatus is based on the classical navigation methods such as the theory of isolines, the lines of position, the principles of route planning, as well as the approximation of the curvilinear route. The mathematical justification of the circle arcs, ellipse and hyperbola used as the approximation lines of both the ship curvilinear route and the control isolines is given. The methods for estimating the vessel approaching to the point of the beginning and end of the turn and for controlling the ship movement along the planned path by measuring the navigational parameters are proposed. The problems of the physical and mathematical feasibility of the route arising at the junction points of the straight and curvilinear parts of the ship route are recommended to be resolved on the principles of transition curves (clothoids), considering the maneuvering characteristics of the vessel. The main theses of the research are supported by the graphical interpretation while the given expressions are ready for practical application. The formalization of the proposed methods in both automatic navigation systems and autonomous ship control systems will allow the navigator on the bases of the configuration of the relative position of landmarks and the ship curvilinear route to solve the problems of processing relevant navigation information in coastal and congested waters more efficiently in conjunction with the traditional pilotage methods, which is especially important for advanced autonomous navigation.

Keywords: curvilinear route, navigation parameter, bearing, distance, isostage, isogon, ellipse, hyperbola, transition curve, “blind pilot” navigation methods.

For citation:

Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. “Planning and control of the ship curvilinear route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

УДК 656.61.052.4

ПЛАНИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

А. С. Васьков¹, А. А. Мироненко²

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

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

В работе исследована возможность использования основных навигационных параметров, традиционно применяемых в лоцманской проводке (пеленг и дистанция), а также их суммы и разности для планирования и контроля движения судна по криволинейным участкам пути в условиях прибрежного плавания. В качестве математического аппарата задействованы классические методы навигации (теория изолиний, линий положения, принципы задания маршрута, включая аппроксимацию криволинейных участков пути). Дано математическое обоснование дуг окружности, эллипса и гиперболы в качестве ведущих для криволинейных участков траекторий заданного пути и одновременно контрольных изолиний. Предложены методы оценки выхода судна в точку начала и конца поворота, а также контроля движения судна по запланированному пути по измерениям навигационных параметров. Проблемы физической и математической реализуемости маршрута, возникающие в точках сопряжения прямолинейных и криволинейных участков, рекомендовано разрешать на основе использования принципов переходных кривых (клотоиды) с учетом маневренных

особенностей судна. Основные положения исследования подкреплены графической интерпретацией, а приведенные выражения доведены до уровня их непосредственного практического применения. Формализация предлагаемых методов в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту и управляющему судном дистанционно решать задачи обработки соответствующей навигационной информации в прибрежных и стесненных районах плавания на качественно новом уровне в неразрывной связи с традиционными лоцманскими методами контроля.

Ключевые слова: криволинейная траектория, навигационный параметр, пеленг, дистанция, изостадия, изогона, эллипс, гипербола, переходная кривая, методы ускоренного контроля.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Для обеспечения безопасности мореплавания, в соответствии с действующими нормативами ИМО (SOLAS-74, STCW-78, A.893(21)), должны осуществляться заблаговременное планирование маршрута и текущий контроль движения судна, что подтверждено многочисленными исследованиями [1]–[20]. Распространенными причинами посадок на мель и касаний грунта являются неудовлетворительный контроль местоположения судна, навигационные ошибки и неверная интерпретация измеренных параметров [21]–[24].

В прибрежном плавании и стесненных водах наиболее распространенным, простым и удобным способом контроля движения судна относительно запланированного маршрута — линии запланированного пути (ЛЗП), является регулярное измерение навигационных параметров (НП). Традиционными НП, измеряемыми для этих целей особенно при лоцманской проводке, являются пеленги или дистанции до навигационных неподвижных ориентиров или их комбинация (например, технология параллельной индексации (ПИ) [4], [5], [12], [14], [17]–[20], [25]). Значения этих НП, их изолинии и параллельный индекс используются в качестве ведущих линий положения (ВЛП) по ЛЗП, а также ограждающих линий положения (ОЛП) относительно опасностей и контроля поворота (контрольных линий положения (КЛП)) [4], [5], [11], [17], [19], [20], [25]. Теоретические основы, рекомендации по использованию и оценке полосы, занимаемой судном при движении на прямолинейных участках маршрута, применение НП-пеленга и дистанции как в зарубежных [16–20], [25], так и отечественных [4], [5], [7], [11], [12], [14] источниках хорошо проработаны. Оценки погрешностей параллельного индексирования и алгоритм выбора наилучшего НП в качестве ВЛП, ОЛП или КЛП, рассмотрены в работе авторов [5].

Проблемным остается вопрос контроля движения судна по криволинейной траектории. Судоводителю недостаточно знания точных значений координат местоположения судна (бокового смещения относительно ЛЗП), текущего курса судна, направления и величины вектора скорости относительно грунта, следует оценивать угловую скорость поворота судна во взаимосвязи со скоростью движения судна относительно грунта по запланированному радиусу кривизны траектории. Некорректным является применение дуги окружности постоянного радиуса в качестве аппроксимации криволинейного участка ЛЗП из-за невозможности физической реализации процесса поворота реального судна по ней [11].

Планирование маршрута и режима движения подвижных объектов (судна) является предметом множества исследований и остается актуальным [1]–[3], [7], [10], [11], [13], [15], [19], поскольку представляет основу автономной и интеллектуальной навигации. Анализ маршрута и режима движения судна показывает общность решений — декомпозицию этой фундаментальной проблемы на следующие взаимосвязанные подзадачи:

1. Формализация района и условий плавания, навигационной обстановки.

2. Планирование физически реализуемого маршрута заданной гладкости программных режимов движения из начального положения в целевое с учетом маневренных качеств и особенностей объекта, без перегрузок исполнительных механизмов.

3. Генерирование, отслеживание программных движений в систему управления по принципу «невозмущенного-возмущенного движения» Ляпунова – Летова для малых отклонений или коррекция программных движений при значительных отклонениях.

Целью исследования является исключение недостатков применения различных кривых (окружностей, эллипсов, клотоид, полиномов, сплайн-функций, сигмоидальных и т. п.) в автоматизированных навигационных комплексах [1], [2], [6], [7], [10], [13], [15], [16], [19], [22], [25]:

- «а-физичность» задания криволинейных участков маршрута, т. е. невозможность выполнения поворота физическим объектом, в частности судном, по некоторым видам кривых;
- уход от традиционных способов контроля процесса поворота судна ускоренными навигационными методами с «привязкой» к ориентирам измеряемыми НП;
- слабая взаимосвязь традиционных способов задания и контроля маршрута с применяемыми методами в ECDIS и системах автоматического управления по траектории;
- невозможность обеспечения точной проводки судна при автоматическом или интеллектуальном управлении по ЛЗП;
- использование неединообразных выражений для задания всей ЛЗП и полосы проводки.

К проблемам планирования криволинейных траектории движения судна можно отнести вопросы математического описания поворота, включая «привязку» элементов аппроксимирующей кривой к особенностям узкости (радиусу кривизны и его изменению), маневренным качествам судна, традиционным методам контроля движения в судовождении по НП.

Таким образом, ранее изложенное указывает на необходимость разработки новых моделей криволинейных участков маршрута судна средствами современных ECDIS во взаимосвязи так же, как с традиционными (лоцманскими / ускоренными) методами планирования и управления по ЛЗП, в том числе, в автоматическом режиме.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Под построением программных движений [11] понимается формализация процесса перемещения одной точки судна по заданной траектории с заданным скоростным режимом. Положение и движение судна относительно грунта определяются прямоугольными координатами его ЦТ (Og, Xg, Yg), вектором скорости и его компонентами: истинным курсом, углом дрейфа, линейной и угловой скоростью (рис. 1).

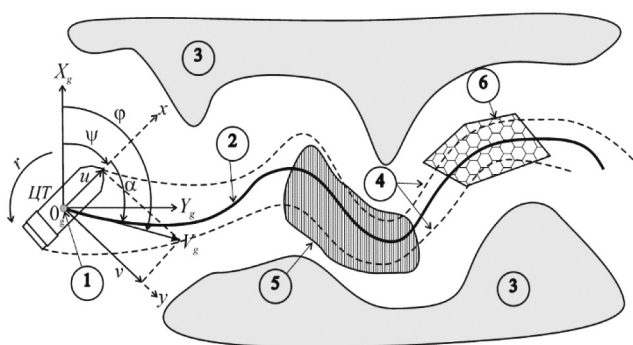


Рис. 1. Элементы планирования движения судна в стесненных водах:

- ψ — угол курса судна; V_g , ϕ — вектор скорости перемещения ЦТ судна относительно грунта и его направление; u , v — продольная и поперечная составляющие скорости;
 α — угол дрейфа в ЦТ судна; r — угловая скорость;
 1 — начальное положение; 2 — оптимальная траектория; 3 — навигационные опасности;
 4 — безопасная полоса проводки; 5 — особые условия; 6 — правовые ограничения

Кинематические параметры взаимосвязаны между собой, что позволяет использовать их для решения различных задач движения судна, и представляются при малости скоростей изменения дрейфа следующими соотношениями [11]:

$$V_g = \sqrt{u^2 + v^2}; u = V_g \cos \alpha; v = V_g \sin \alpha; \tan \alpha = \frac{v}{u}; \frac{d\alpha}{dt} = 0;$$

$$r = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{V_g}{R}; R = \frac{V_g}{r}, \quad (1)$$

где R — радиус кривизны криволинейного участка пути судна, м.

В диаметральной плоскости (ДП) судна существует точка (центр вращения или полюс поворота), в которой направление мгновенного вектора скорости относительно грунта совпадает с направлением ДП, т. е. угол дрейфа равен нулю [11] — рис. 2, а ее абсцисса находится из выражения

$$X_{пп} = \frac{u}{r} \tan \alpha = R \sin \alpha, \quad (2)$$

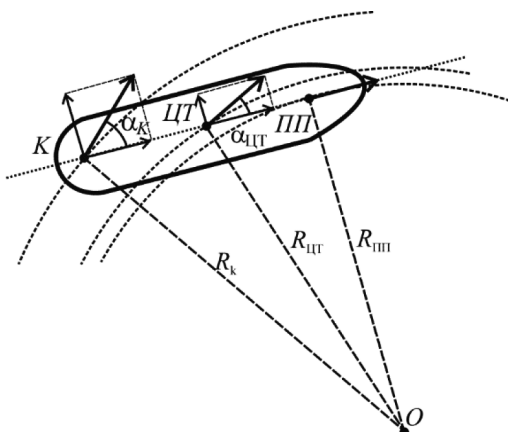


Рис. 2. Изменение характеристик криволинейного движения по длине судна

откуда следует, что угол дрейфа достигает наибольшего значения на срезе кормы, уменьшается в направлении носовой части судна, в полюсе поворота равен нулю, а далее меняет знак на противоположный. Линейные скорости любой точки судна относительно выбранного полюса при криволинейном движении определяются по формуле Ривальса [11]:

$$u_i = u + rY; v_i = v - rX. \quad (3)$$

В общем случае любая произвольная точка судна движется по криволинейной траектории со своим радиусом кривизны, угол дрейфа в которой определяется из выражений (1) и (3):

$$\tan \alpha_i = \frac{v_i}{u_i} = \frac{v - rX}{u + rY}. \quad (4)$$

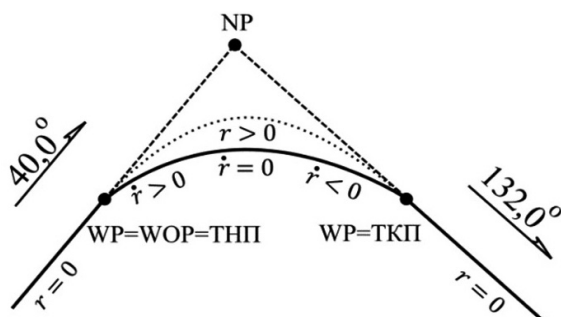


Рис. 3. Процесс поворота судна:
NP Node Point (узловая точка) — точка пересечения продолжений прямолинейных участков ЛЗП;
WP — путевые точки; ТНП = WOP, ТКП — соответственно точки начала и конца поворота

Судовождение на криволинейных участках маршрута относится к одному из наиболее ответственных моментов плавания [12], [14], [19], [20], [22]. В практическом судовождении процесс поворота разбивается на три периода [2], [11], [12], [14]: увеличение угловой скорости до заданной, поддержание ее запланированного значения и уменьшение до нуля при выходе на требуемый курс (рис. 3).

Расчеты выполняются исходя из опыта конкретного судоводителя и корректируются в зависимости от реальных условий в ходе маневра.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В целях совершенствования процессов планирования криволинейных участков ЛЗП судна и последующего контроля его движения в системах управления предлагается рассмотреть кривые второго порядка, включая их особенности, во взаимосвязи с традиционными НП и их комбинациями, измеряемыми навигационными средствами, в том числе автоматически.

Аппроксимация криволинейного участка траектории дугой окружности. В современных ECDIS, по исследованиям [1], [3], [4], [6], [10], [11], [24], криволинейные участки траектории судна в подавляющем большинстве случаев задаются дугой окружности. При этом контроль движения судна по этому участку ЛЗП целесообразно осуществлять НП — заданной дистанцией до ориентира, которой соответствует ВЛП — дуга малого круга (изостадия), также применяемая в качестве КЛП. Ее уравнение в прямоугольной системе координат с центром в ориентире рис. 4 (точка $O(A)$) и со смещенным центром имеет следующий вид и параметры [5]:

$$x^2 + y^2 = R^2 = D_3; (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 = D_3; \tau_D = \Pi 180; g_D = 1, \quad (5)$$

где x_0, y_0 — прямоугольные координаты смещенного центра окружности;

x, y, Π — прямоугольные координаты, пеленг на ориентир;

D_3, τ_D, g_D — ведущий и контрольный НП — заданная дистанция, направление и модуль градиента.

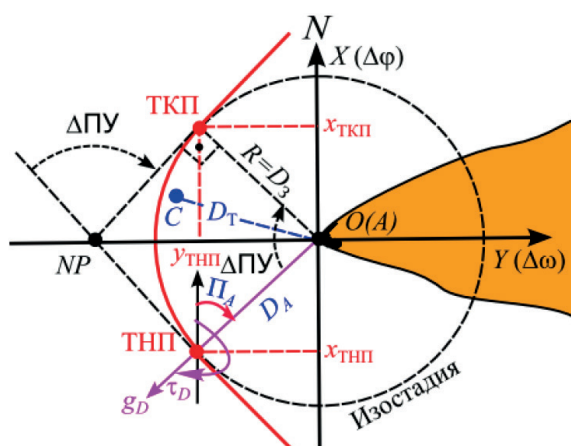


Рис. 4. Криволинейные участки траектории в виде дуги окружности:

$R = D_3 = \text{const}$ — НП для ВЛП и КЛП;

$x_{\text{THP}}, y_{\text{THP}}, x_{\text{TKP}}, y_{\text{TKP}}$ — прямоугольные координаты ТНП, ТКП;

$\Pi_A, D_A(D_3)$ — полярные координаты (контрольный пеленг и дистанция ТНП)

Координаты точек NP , THP , TKP определяются радиусом дуги окружности R и углом поворота (изменением направления пути $\Delta\PY$) из рис. 4:

$$\begin{aligned} x_{NP} &= 0; y_{NP} = R / \cos \frac{\Delta\PY}{2}; x_{THP} = -R \sin \frac{\Delta\PY}{2}; y_{THP} = R \cos \frac{\Delta\PY}{2}; \\ x_{TKP} &= R \sin \frac{\Delta\PY}{2}; y_{TKP} = R \cos \frac{\Delta\PY}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Боковое отклонение текущей позиции судна (XTE) относительно криволинейной ЛЗП — дуги окружности — оценивается в виде

$$XTE = D_T - D_3 = D_T - R. \quad (7)$$

В практическом судовождении процесс контроля происходит следующим образом. На индикаторе кругового обзора (ИКО) радиолокационной станции (РЛС) выставляется подвижный круг дальности (ПКД) радиусом $R = D_3$ (рис. 5). Момент прихода судна в ТНП контролируется по касанию

выставленным ПКД ориентира A и пеленгу Π_A . Руль переключается на угол, обеспечивающий, по данным маневренных характеристик судна и условиям плавания, выход на запланированное значение радиуса поворота R .

Контроль процесса поворота осуществляется отслеживанием на ИКО РЛС перемещения отметки ориентира A по ПКД, т. е. регулярным сравнением текущей измеренной дистанции до ориентира с запланированной ($R = D_3$). Отклонения позиции судна от запланированной траектории (отметка ориентира A справа ($D_T > D_3$), слева ($D_T < D_3$) от ПКД) компенсируются соответствующими (влево / вправо) переключками руля для коррекции курса судна. Например, на рис. 4 для точки C ($D_T < D_3$) требуется (как минимум) уменьшение величины переключки руля.

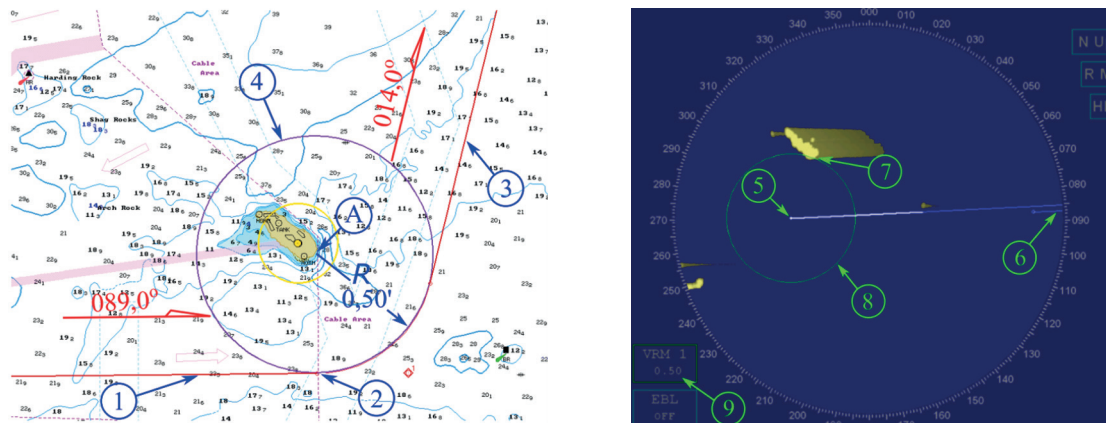


Рис. 5. Контроль процесса поворота

- по ВЛП — изостадии ($R = D_3 = \text{const}$) (ПКД): A — приметный ориентир;
1 — прямолинейный отрезок ЛЗП ($089,0^\circ$); 2 — ТНП; 3 — прямолинейный отрезок ЛЗП ($014,0^\circ$);
4 — ВЛП $R = D_3 = 0,50$ мили контроля поворота; 5 — текущая позиция судна на ИКО;
6 — отметка курса; 7 — отметка ориентира для контроля поворота (судно в ТНП);
8 — ПКД = ВЛП контроля поворота; 9 — значение ПКД = ВЛП = 0,50 мили

Дуга малого круга является также изолинией горизонтального угла, измеренного непосредственно или как разность пеленгов двух ориентиров — изогона рис. 6 [26]:

$$\gamma = \Pi_A - \Pi_B; \gamma = \Pi_A + \delta; \text{ctg } \delta = \frac{D_A \sin \gamma}{D_B - D_A \cos \gamma}; g_\gamma = 57,3 \frac{d}{D_A D_B}; R = \frac{d}{2 \sin \gamma}, \quad (8)$$

где γ, d — горизонтальный угол, базовое расстояние (расстояние между ориентирами);
 Π_A, Π_B, δ — пеленги на ориентиры (A, B) и вспомогательный угол;
 τ_γ, g_γ — направление и модуль градиента горизонтального угла (разность пеленгов);
 D_A, D_B — дистанции до ориентиров A, B .

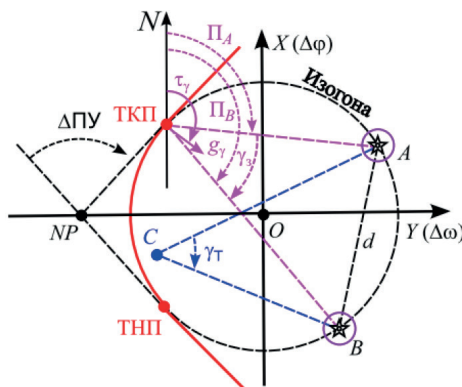


Рис. 6. Криволинейный участок траектории в виде дуги окружности:

- $\gamma_3 = \text{const}$ — заданный горизонтальный угол — НП для ВЛП;
 Π_A, Π_B — пеленги на ориентиры A и B для контроля выхода судна в ТНП и ТКП

$$b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}} = 0,5\sqrt{(D_A + D_B)^2 - d^2}; \quad a > 0,5d > b; \quad e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} = 0,5\frac{d}{a} = \frac{d}{D_A + D_B}; \quad (11)$$

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

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

Π_{cp}, w — средний пеленг и базовый угол;

$\tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$ — направление и модуль градиента эллипса.

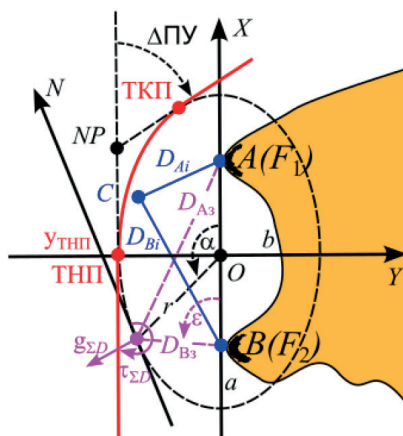


Рис. 8. Криволинейный участок траектории в виде дуги эллипса:
 $(D_A + D_B)_3 = \text{const}$ — НП для ВЛП; $(D_{Ai} + D_{Bi}) \neq (D_A + D_B)_3$ — смещение с траектории

По радиусам-векторам дистанций D_A и D_B от ориентиров из выражений (11), уравнению (10) и базовому расстоянию в системе управления определяются координаты точек дуги эллипса для построения криволинейного участка маршрута:

$$x = \frac{D_A - a}{e} = \frac{D_A^2 - D_B^2}{2d}; \quad y = \sqrt{D_B^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 - d^2}{2d} \right)^2} = \sqrt{D_A^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 + d^2}{2d} \right)^2}. \quad (12)$$

Уравнение эллипса в полярных координатах с началом в фокусе — ориентире A с учетом преобразований по выражениям (11) дает радиусы-векторы, связанные с измеряемыми дистанциями D_A, D_B до ориентиров, базовым расстоянием d и перичентральным углом, который может использоваться для контроля выхода в ТНП или ТКП и движения по дуге эллипса:

$$\rho_i = D_i = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \varepsilon_i} = \frac{0,5(D_A + D_B)((D_A + D_B) - d^2)}{D_A + D_B + d \cos \varepsilon_i}, \quad (13)$$

где ρ_i — радиус-вектор от фокуса ориентира A до точек дуги эллипса;

ε — перичентральный угол от направления базы — оси OX до направления из фокуса — ориентира на текущую точку дуги эллипса.

Боковое смещение судна (XTE) с ЛЗП по дуге эллипса контролируется системой управления сравнением текущей суммы дистанций с заданной контрольной $(D_A + D_B)_3 = \text{const}$ или определяется как смещение линии положения из выражений (11) (см. рис. 8) и корректируется соответствующими переключками руля (влево / вправо):

$$XTE = \frac{(D_A + D_B) - (D_A + D_B)_3}{2 \cos \frac{w}{2}}. \quad (14)$$

Аппроксимация криволинейного участка маршрута дугой гиперболы. Контроль движения судна по криволинейному участку ЛЗП, аппроксимированному дугой гиперболы в системе управления целесообразно осуществлять НП — разностью дистанций до ориентиров (A, B), которые являются фокусами гиперболы, соответствующей ВЛП. Ее уравнение в прямоугольной системе координат, связанной с центром базы между ориентирами (A, B) рис. 9 или со смещенным центром, имеет вид и соответствующие параметры [26], [27]:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad \frac{(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1; \quad (15)$$

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

$$\Delta_D = \Pi_{\text{ср}} \pm 90^\circ = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 90^\circ; \quad g_{\Delta D} = \left| 2 \sin \frac{w}{2} \right|; \quad w = \Pi_B - \Pi_A, \quad (16)$$

где $\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}$ — соответственно направление и модуль градиента гиперболы.

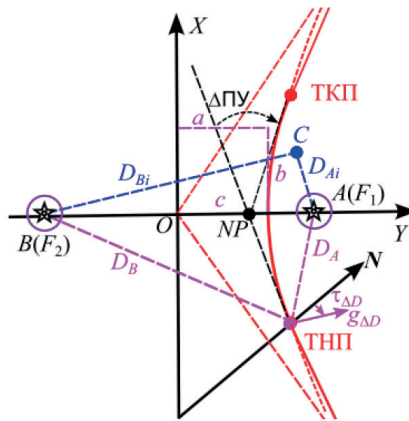


Рис. 9. Криволинейный участок траектории в виде дуги гиперболы:
 $D_B - D_A = \text{const}$ — НП для ВЛП; $(D_{Ai} - D_{Bi}) \neq (D_A - D_B)_3$ — смещение с траектории

По радиусам-векторам дистанций D_A и D_B от ориентиров, уравнению (15) и базовому расстоянию в системе управления определяются координаты точек дуги гиперболы для построения криволинейного участка маршрута:

$$D = ex - a; \quad D = a + ex;$$

$$x = \frac{(D_A + a)}{e} = \frac{\Delta D(2D_A + \Delta D)}{2d}; \quad y = \sqrt{\frac{4b^2(D_A + a)^2}{d^2} - b^2} = \sqrt{\frac{b^2(2D_A + \Delta D)^2}{d^2} - b^2}. \quad (17)$$

Касательная (прямолинейных участков маршрута) к дуге гиперболы в ТНП, ТКП соответствует в судовождении линии положения, уравнение и коэффициент наклона касательной к базе между ориентирами (оси OX) определяются выражениями:

$$k = \frac{b^2 x_T}{a^2 y_T} = \left(\frac{d^2}{(D_B - D_A)^2} - 1 \right) \frac{x_T}{y_T}; \quad y = y_T + \left(\frac{d^2}{(D_B - D_A)^2} - 1 \right) (x - x_T) \frac{x_T}{y_T}, \quad (18)$$

где k — коэффициент наклона касательной к оси OX ;

x_T, y_T — координаты точки касательной к гиперболе (ТНП или ТКП).

Уравнение гиперболы в полярных координатах с началом в фокусе — ориентире A , подобно эллипсу, после преобразований даст радиусы-векторы, связанные с измеряемыми дистанциями

до навигационных ориентиров D_A, D_B , базовым расстоянием d и перицентральным углом, который может использоваться для контроля выхода в ТНП или ТКП и движения по гиперболе:

$$\rho_i = D_i = \frac{a(e^2 - 1)}{1 + e \cos \epsilon} = \frac{d^2 - (D_B - D_A)^2}{2(D_B - D_A + d \cos \epsilon_i)}. \quad (19)$$

Боковое смещение судна (XTE) с ЛЗП на криволинейном участке — дуге гиперболы, контролируется системой управления сравнением текущей и заданной $(D_B - D_A)_3 = \text{const}$ разности дистанций или определяется как смещение линии положения из выражений (16) (см. рис. 9) и корректируется соответствующими перекладками руля (влево / вправо):

$$XTE = \frac{(D_B - D_A) - (D_B - D_A)_3}{2 \sin \frac{w}{2}}. \quad (20)$$

Контроль выхода судна в ТНП, ТКП при движении на криволинейном участке, представленном эллипсом или гиперболой, лучше осуществлять по пеленгам ориентиров ($\Pi_{\text{ТНП}}, \Pi_{\text{ТКП}}$) [5].

Аппроксимация криволинейной траектории клотоидой. В точках сопряжения прямолинейных и криволинейных участков траектории, заданными дугами эллипса, гиперболы или окружности возникает ситуация разрывов первого и второго рода (см. рис. 4–7), т. е. одновременно на криволинейных и прямолинейных участках пути значения угловых скоростей (1) и ускорений не совпадают. Следовательно, в точках сопряжения заданная траектория физически и математически нереализуема подвижным объектом, в частности судном. Для устранения этого недостатка при построении непрерывной траекторий подвижных объектов применяют кривые с изменяющейся кривизной по линейному закону (например, клотоиды рис. 10 [11]):

$$R_k = \frac{K^2}{S} = \frac{R l_k}{S}; K = \sqrt{R l_k}, \quad (21)$$

где R_k, R — радиусы кривизны клотоиды и круговой кривой;

K — постоянная, определяющая изменение радиуса кривизны (параметр клотоиды);

S — расстояние от начала клотоиды, соответствующей ТНП, до текущей позиции;

l_k — длина переходной кривой (клотоиды).

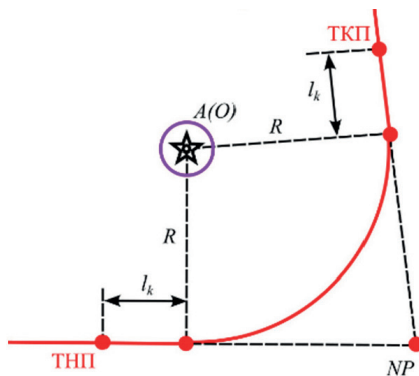


Рис. 10. Схема круговой и переходной кривых

Длина клотоиды может быть выбрана из маневренных элементов судна как функция от угла перекладки руля и расстояния, проходимого до достижения требуемого радиуса кривизны траектории и определяется также соотношением скорости судна относительно грунта и угловой скорости поворота. Длину переходной кривой целесообразно принять равной начальной поворотливости судна, т. е. до двух с половиной от его длины: $l_k \leq 2,5 L$ (Рез. MSC.137(76)).

При нулевой длине переходной кривой радиус кривизны клотоиды соответствует бесконечности (в точке сопряжения прямолинейного участка и клотоиды). Радиус кривизны клотоиды (в точке

сопряжения клотоиды и дуги окружности) подбирается изменением длин переходной кривой и радиуса круговой кривой. Параметр клотоиды можно выразить через расчетную скорость движения и принятую величину нарастания центростремительного ускорения:

$$K = \sqrt{\frac{V^3}{47C}}, \quad (22)$$

где V — расчетная скорость движения, км/ч;

C — величина нарастания центростремительного ускорения, м/с³;

47 — коэффициент перехода из км/ч в м/с.

Геометрия клотоиды подходит для задания криволинейной траектории при движении судна с постоянной скоростью ($K = \text{const}$). Тогда из выражений (16), (22) минимально-допустимую длину клотоиды можно рассчитать из следующего выражения:

$$l_k = \frac{V^3}{47CR}. \quad (23)$$

Для контроля движения по криволинейной клотоидой траектории из выражения (16) при заранее заданном значении параметра клотоиды ($K = \text{const}$) получается тождество запланированного поворота, нарушение которого требует действий по переключке руля (влево / вправо), а с учетом выражения (1) — следующий текущий радиус кривизны:

$$K^2 = Rl_k = SR_k = \text{const}; R_k = \frac{V}{r}. \quad (24)$$

Поворот и параллельный перенос начала координат. Расположения систем навигационных ориентиров, совпадающих с центром принятой системы координат (см. рис. 4, 6, 8, 9), являются частными случаями в судовождении. При представлении этими кривыми (5), (10), (15) траекторий движения судна на любых участках маршрута необходимы аффинные преобразования переноса и поворота системы координат, связанной с ориентирами, в положения, определяющие планируемые ЛЗП (см. рис. 4, 6, 8, 9). При этом перенос определяется приращениями локальных прямоугольных или географических координат, а угол поворота оси, связанной с ориентирами, — разностью ее направлений относительно меридиана рис. 11 [27]:

$$\vec{S} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = \sqrt{\Delta \varphi^2 + \Delta w^2}; \beta = \Pi_{X'} - \Pi_X, \quad (25)$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta X', \Delta Y'$ — относительные переносы систем координат;

$\vec{S}, \beta$ — перенос и угол поворота системы координат, связанной с ориентирами;

$\Delta \varphi, \Delta w$ — разность широт и отстояние географических координат переноса начала системы координат в требуемое положение; $\Pi_{X'}, \Pi_X$ — направления осей до и после поворота.

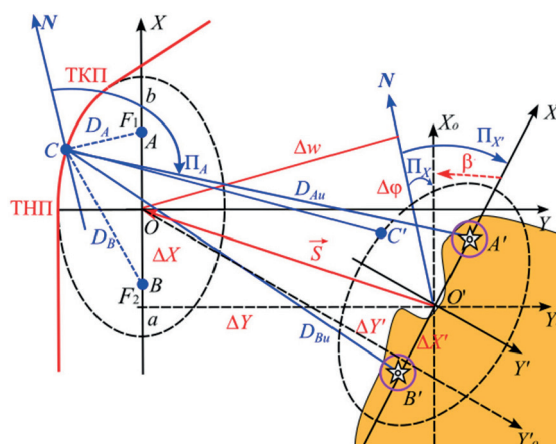


Рис. 11. Перенос и поворот системы координат относительно центра базы навигационных ориентиров

Координаты криволинейных траекторий (12), (17) после поворота и переноса системы координат относительно исходной системы, связанной с ориентирами ($O'X'Y'$), определяются выражениями:

$$x = x' \cos - y' \sin - \Delta X; y = x' \sin + y' \cos + \Delta Y. \quad (26)$$

Взаимосвязь пеленгов и дистанций с судна на навигационные ориентиры (A', B') в процессе его движения по криволинейной ЛЗП с координатами ориентиров определяется из соответствующих локсодромических треугольников, образованных положением судна и ориентиров (см. рис. 11):

$$D_{Au} = \sqrt{\Delta \varphi_A^2 + \Delta w_A^2}; \operatorname{tg} \Pi_A = \frac{\Delta w_A}{\Delta \varphi_A}; D_{Bu} = \sqrt{\Delta \varphi_B^2 + \Delta w_B^2}; \operatorname{tg} \Pi_B = \frac{\Delta w_B}{\Delta \varphi_B}. \quad (27)$$

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение кривых второго порядка во взаимосвязи с конфигурацией расположения ориентиров и криволинейного участка ЛЗП в современных навигационных комплексах позволит расширить спектр применимости лоцманских и автоматических методов планирования и контроля движения судна по НП, что очень важно для перспективного автономного судовождения.

2. В дальнейшем подлежит изучению проблема наилучшего выбора взаимного расположения навигационных ориентиров для аппроксимируемого участка маршрута с оценкой оптимального выбора традиционно измеряемых НП (пеленг и дистанция), например, с точки зрения наилучшей точности проводки судна или простоты контроля движения судна по НП.

3. Актуальным является рассмотрение иных вариантов кривых, позволяющих аналитически задавать физически реализуемые программные траектории, в том числе во взаимосвязи с предполагаемыми силовыми воздействиями в целях повышения безопасности традиционного и автономного судовождения в стесненных и портовых водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров М. М. Методы и алгоритмы автоматического управления движением судов по линии заданного радиуса поворота / М. М. Азаров, В. И. Ляпин, О. Б. Кудинов // Системы управления и обработки информации. — 2016. — № 4 (35). — С. 28–47.
2. Васьков А. А. Формирование траектории движения судна / А. А. Васьков // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион, техн. науки : проблемы водного транспорта. — 2004. — Спецвып. — Ч. 1. — С. 14–16.
3. Васьков А. С. Анализ процесса одерживания поворота судна / А. С. Васьков, А. Н. Штанько, А. В. Еськова // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 3–1 (57). — С. 71–76. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.009.
4. Васьков А. С. Проблемы контроля поворота судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 3 (65). — С. 17–20.
5. 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.
6. Ворохобин И. И. Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, Ю. В. Казак // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 65–69.
7. Гриняк В. М. Планирование маршрутов судов через акватории с интенсивным движением / В. М. Гриняк, А. В. Шуленина, Л. И. Прудникова, А. С. Девятисильный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2021. — Т. 9. — № 2 (33). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018.
8. Довгоброд Г. М. Упрощенное построение закона управления, обеспечивающего движение объекта по заданной криволинейной траектории / Г. М. Довгоброд, Л. М. Клячко // Гироскопия и навигация. — 2011. — № 3 (74). — С. 24–33.
9. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

10. Коренев А. С. Формирование траекторий движения безэкипажного судна / А. С. Коренев, С. П. Хабаров, А. Г. Шпекторов // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4–1 (54). — С. 158–165. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.047.
11. Мироненко А. А. Методология формирования навигационной обстановки и программирования движений судна / А. А. Мироненко. — Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2016. — 162 с.
12. Песков Ю. А. Руководство по «Организации мостика» для судов / Ю. А. Песков. — Новороссийск: НГМА, 2002. — Т. 1. — 146 с.
13. Смоленцев С. В. Проблема прогнозирования траекторий движения судов в акватории / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солодовниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.
14. Таратынов В. П. Судовождение в стесненных водах / В. П. Таратынов. — М.: Транспорт, 1980. — 128 с.
15. Ююкин И. В. Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
16. Benedict K. Simulation-Augmented Methods for Safe and Efficient Manoeuvres in Harbour Areas / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf // TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2016. — Vol. 10. — № 2. — Pp. 193–201. DOI: 10.12716/1001.10.02.02.
17. Bowditch N. American Practical Navigator / N. Bowditch. — Bethesda, Maryland: National imagery and mapping agency, 2012. — 898 p.
18. House D. J. Command Companion of Seamanship Techniques / D. J. House. — London, New York: Routledge, 2011. — 235 p.
19. Sivriu G. Planning and execution of blind pilotage and anchorage / G. Sivriu, S. Georgescu // Constanta Maritime University Annals. — 2010. — Vol. 14. — Pp. 35–40.
20. Swift A. I. Bridge team management. A Practical Guide / A. I. Swift. — Southall, Meddlesex: O’Sullivan Printing, 2004. — 118 p.
21. Жмур А. А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследованиях случаев посадки судов на мель / А. А. Жмур, В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.
22. Ernstsens J. Human Error in Pilotage Operations / J. Ernstsens, S. Nazir // TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — № 1. — Pp. 49–56. DOI: 10.12716/1001.12.01.05
23. Jurdzinski M. Causes of ships groundings in terms of integrated navigation model / M. Jurdzinski // Annual of navigation. — 2017. — No. 24. — Pp. 119–135. DOI: 10.1515/aon-2017-0009.
24. Report on the investigation of the grounding of the ultra-large container vessel. CMA CGM Vasco de Gama Thorn Channel, Southampton, England. 22 August 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/59ef2327ed915d6aaafc2ef0/MAIBInvReport23_2017.pdf (дата обращения 28.09.2022).
25. 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.
26. Васьков А. С. Основы геометрии земного эллипсоида и картографии в судовождении: Уч. пособие / А. С. Васьков, А. А. Мироненко. — Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2022. — 114 с.
27. Мореходные таблицы (МТ-2000). № 9011. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — 576 с.
28. Довгоброд Г. М. Универсальный измеритель скорости поворота для морских и речных судов / Г. М. Довгоброд // Морское оборудование и технологии. — 2020. — № 2 (23). — С. 14–16.

REFERENCES

1. Azarov, M. M., V. I. Lyapin, and O. B. Kudinov. “Methods and algorithms of automatic control of ship motion at preset turning radius.” *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* 4(35) (2016): 28–47.
2. Vas’kov, A. A. “Formirovanie traektorii dvizheniya sudna.” *Izv. Vuzov. Sev.-Kavkaz. region. Tekhn. Nauki. Problemy vodnogo transp Spetsvyp* (2004): 14–16.

3. Vas'kov, Anatoliy S., Aleksandr N. Shtanko, and Anna V. Eskova. "Analysis of the process of obsessing the turning of the vessel." *Marine intellectual technologies* 3–1(57) (2022): 71–76. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.009.
4. Vaskov, A. S., and A. A. Mironenko. "The problems of the vessel's course alteration control." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(65) (2011): 17–20.
5. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "The ship motion control by navigational parameters and parallel indexes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.
6. Vorokhobin, I., V. Severin, and Y. Kazak. "Density distribution vectorial error turn ship." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 65–69.
7. Grinyak, V.M., A. V. Shulenina, L. I. Prudnikova, and A. S. Devyatitsilnyi. "Ships route planning on heavy-traffic marine area." *Modeling, optimization and information technology* 9.2(33) (2021). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018.
8. Dovgobrod, G. M., and L. M. Klyachko. "Simplified deduction of control law providing a vehicle's motion on a specified nonlinear path." *Gyroscopy and Navigation* 3(74) (2011): 24–33.
9. Karetnikov, Vladimir V., Sergey V. Kozik, and Artem A. Butsanets. "Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
10. Korenev, Alexei S., Sergei P. Khabarov, and Andrei G. Shpectorov. "A route calculation for unmanned vessel." *Marine intellectual technologies* 4–1(54) (2021): 158–165. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.047.
11. Mironenko, A. A. *Metodologiya formirovaniya navigatsionnoi obstanovki i programmirovaniya dvizhenii sudna*. Novorossiisk: RIO GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2016.
12. Peskov, Yu. A. *Rukovodstvo po «Organizatsii mostika» dlya sudov*. Vol. 1. Novorossiisk: NGMA, 2002.
13. Smolentsev, Sergey V., Dmitry V. Isakov, and Mikhail V. Solodovnichenko. "The problem of forecasting vessels trajectories in the water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.
14. Taratynov, V. P. *Sudovozhdenie v stesnennykh vodakh*. M.: Transport, 1980.
15. Yuyukin, Igor V. "Optimal spline trajectory of the ship informative route in the map-aided navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
16. Benedict, Knud, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, and M. Baldauf. "Simulation-augmented methods for safe and efficient manoeuvres in harbour areas." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.2 (2016): 193–201. DOI: 10.12716/1001.10.02.02.
17. Bowditch, N. *American Practical Navigator*. Bethesda, Maryland: National imagery and mapping agency, 2012.
18. House, D. J. *Command Companion of Seamanship Techniques*. London, New York: Routledge, 2011.
19. Sivriu, G., and S. Georgescu. "Planning and execution of blind pilotage and anchorage." *Constanta Maritime University Annals* 14 (2010): 35–40.
20. Swift, A. I. *Bridge team management. A Practical Guide*. Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004.
21. Zhmur, Andrew A., and Vladimir A. Loginovsky. "Using a situation awareness theory in a study of grounding incident investigations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.
22. Ernstsens, J., and S. Nazir. "Human Error in Pilotage Operations." *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.1 (2018): 49–56. DOI: 10.12716/1001.12.01.05
23. Jurdziński, Mirosław. "Causes of Ships Groundings in Terms of Integrated Navigation Model." *Annual of Navigation* 24 (2017): 119–135. DOI: 10.1515/aon-2017-0009.
24. Report on the investigation of the grounding of the ultra-large container vessel. Web. 28 Sept. 2022 <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/59ef2327ed915d6aaafc2ef0/MAIBInvReport23_2017.pdf>.
25. 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.
26. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. *Osnovy geometrii zemnogo ellipsoida i kartografii v sudovozhdenii*. Novorossiisk: GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2022.
27. *Morekhodnye tablitsy (MT-2000). № 9011*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002.
28. Dovgobrod, G. M. "Universal Turn Speed Meter for Sea and River Vessels." *Morskoe oborudovanie i tekhnologii* 2(23) (2020): 14–16.

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, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vas'kov, Anatoliy S. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Ushakov State
Maritime University
93 Lenin Ave., Novorossiysk, 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, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 5 марта 2023 г.

Received: March 5, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-416-425

FEATURES OF FENDER PROTECTION APPLICATION ON UNCREWED PORT TUGS

O. O. Danilov

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

In this paper, the variants of the fender protection of traditional port tugs and the possibility of using this protection on unmanned vessels of such type are considered; the main elements of such protection are investigated. At present, the technical level of mechanisms, instruments and software allows creating unmanned and crewless vessels. One of the promising directions in the development of such vessels is port tugs, since having relatively large river and sea vessels they perform production tasks in the port water area and approaches to it. An integral part of the work of a port barthing tug or escort tug is bulks and approaches in tight to the towed object or vessel. The combination of a small size, the nature of the tasks performed and the widespread use of such vessels is one of the positive factors for the introduction of unmanned technologies on these vessels. There is a wealth of experience in equipping traditional port tugs with different types of fender protection, which is advisable to use to determine the equipment of unmanned vessels. The fender protection must be installed depending on the conditions in which production tasks will be performed, in addition, high operational requirements must be imposed on the fenders, due to the absence of people on board who can fix the separation of the protection and take measures to replace it in a timely manner. These conditions may depend on the types of production tasks that an unmanned port tug will perform. For example, the mooring of a bulk carrier and a tanker has some features, and entails the need to change the fender protection. Also, the various designs of the fender protection elements currently used on port tugs are analyzed in the paper. It allows structuring the main features when choosing a fender protection for an unmanned port tug, such as the towing method, the size of the tug, the size of the contact spot and other conditions.

Keywords: Unmanned tug, fender protection, navigation safety system, unmanned harbor tugs, tug fender protection.

For citation:

Danilov, Oleg O. "Features of fender protection application on uncrewed port tugs." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 416–425. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-416-425.

УДК 656.61.052

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КРАНЦЕВОЙ ЗАЩИТЫ НА БЕЗЭКИПАЖНЫХ ПОРТОВЫХ БУКСИРАХ

О. О. Данилов

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

В работе рассмотрены варианты кранцевой защиты традиционных портовых буксиров и возможность применения этой защиты на безэкипажных судах данного типа. Исследованы основные элементы такой защиты. Отмечается, что в настоящее время технический уровень механизмов, приборов и программного обеспечения позволяют создавать беспилотные и безэкипажные суда. Одним из перспективных направлений при разработке таких судов являются портовые буксиры, поскольку они, обладая по сравнению с речными и морскими судами небольшими габаритами, выполняют производственные задачи на акватории порта и подходах к нему. Неотъемлемой частью работы портового буксира-кантовщика (эскортного буксира) являются навалы, подходы вплотную к буксируемому объекту или судну. Исследованы разные типы кранцевой защиты, которые целесообразно использовать для определения оснащенности безэкипажных судов. Особое внимание обращается на то, что к кранцам должны предъявляться высокие эксплуатационные требования ввиду отсутствия на борту людей, которые могут зафиксировать неисправность и принять соответствующие меры для ее устранения. Изменения кранцевой защиты зависят от видов

производственных задач, которые будет выполнять безэкипажный портовый буксир (например, особенности швартовки балкера и танкера). Рассмотрены и проанализированы различные типы и элементы конструкции кранцевой защиты, применяемые в настоящее время на портовых буксирах, что позволило структурировать основные ее особенности при выборе кранцевой защиты для безэкипажного портового буксира, такие как метод буксировки, размер буксира, размер пятна контакта и др. Особое внимание уделено рассмотрению факторов, обеспечивающих надежную эксплуатацию кранцевой защиты, и решения по проведению ее оперативного ремонта.

Ключевые слова: безэкипажный буксир, кранцевая защита, система безопасности плавания, беспилотные портовые буксиры, кранцевая защита буксира.

Для цитирования:

Данилов О. О. Особенности применения кранцевой защиты на безэкипажных портовых буксирах / О. О. Данилов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 416–425. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-416-425.

Введение (Introduction)

Для успешного выполнения производственной задачи безэкипажному портовому буксиру, как и традиционному, необходима надежная кранцевая защита. Кранцами называются специальные защитные устройства для судов, целью которых является защита корпуса от взаимодействия с другими судами, объектами буксировки. Кранцевая защита, установленная на буксире, препятствует деформации борта путем поглощения энергии удара, а также ее распределения по площади пятна контакта. Безэкипажным буксирам, как правило, необходимо работать у кормы или у бака судна, где выступы и выпуклости конструкции буксируемого судна особенно выражены. Кранцевая защита буксира должна располагаться таким образом, чтобы риск повреждения от столкновения с кормой или баком, а также при качке у борта судна исключались. Кранцевая защита предназначена для защиты как буксира, так и буксируемого судна от повреждений, а кроме того, она позволяет сократить риск соскальзывания вдоль борта в процессе толкания под углом к корпусу буксируемого судна. В ходе выполнения буксиром производственных задач важно соблюдать требования по безопасной эксплуатации, одним из которых является *кранцевая защита*.

Кранцы изготавливают в основном из резины или синтетических заменителей. Помимо технических требований к прогибу и поглощению энергии под нагрузкой, при использовании различных методов крепления и конструкционных ограничений, внимание следует уделить и материалам кранца [1]. Эти материалы должны быть устойчивы к загрязнению, ультрафиолетовому излучению, высоким и низким температурам. Безэкипажным буксирам необходима кранцевая защита. Важно учитывать не только особенности выполнения производственных задач, но и такие факторы, как акватория порта, погодные условия, а также особенности безэкипажных и беспилотных буксиров.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Кранцевая защита играет важную роль при выполнении производственной задачи безэкипажным портовым буксиром. Без нее или при поврежденной кранцевой защите выполнение производственной задачи становится небезопасным или даже невозможным [2]. Повреждение кранцевой защиты возможно получить не только во время работы сбуксиремым объектом, но и вследствие неблагоприятных погодных условий, при которых возможно повреждение или частичная потеря кранцевой защиты (рис. 1 и 2).

Существуют разные типы и элементы кранцевой защиты. *Первый тип* — кранцы из штампованного (экструдированного) профиля, свариваемые системы кранцев с металлической опорой, кранцы, изготовленные из автомобильных покрышек. Кранцы из штампованного (экструдированного) профиля — один из самых распространенных видов. Экструдированные кранцы производят различной длины, формы и размеров: полые прямоугольные и цилиндрические, полнотелые, повторяющие изгибы корпуса буксира, скошенные, перфорированные. Экструдированные кранцы являются весьма гибкими в плане дизайна [3].



Рис. 1. Следование буксира на акватории порта Усть-Луга к месту работ при неблагоприятных погодных условиях



Рис. 2. Следование буксира на акватории порта Усть-Луга к месту проведения ремонтных работ кранцевой защиты

Экструзия — способ производства, при котором невулканизированная резиновая смесь проходит через головку экструдера, принимает необходимую форму и затем вулканизуется. Отлитые модули кранцевых блоков обладают всеми преимуществами *экструзируемых* и кроме того, позволяют надежно их крепить и ремонтировать, так как отдельные блоки можно легко заменять (рис. 2). Следующий тип — свариваемые системы кранцев с металлической опорой, используемые в случаях, когда необходимо надежное крепление. Бак или корма буксира могут быть оборудованными горизонтальной системой кранцев, например, экструдированных цилиндрической формы или вертикальными блоками. Часто используют комбинацию этих типов. Блочные кранцы поддаются легкой замене в случае повреждения и весьма подходят для вертикального ограждения кормы и носовой части, где износ особо велик (рис. 3).

Некоторые типы кранцев включают покрышки грузовиков, которые вырезают под необходимый размер и усиливают стальными прутами. Существует отдельный тип, характеризующийся большой поглощающей способностью и мягкостью, что позволяет иметь большую площадь соприкосновения и «приклеивание» под нагрузкой.

Буксиры могут быть оснащены пневматическими или заполненными пеной кранцами, особенно в сложных районах плавания. Иногда необходимо использовать кранцы, не оставляющие следов, например, при работе с судами, корпуса которых белого или серого цвета, пассажирскими

или военными [4]. В данном случае могут использоваться пеньковые кранцы в дополнение к обычным, а также кранцы из серой резины.

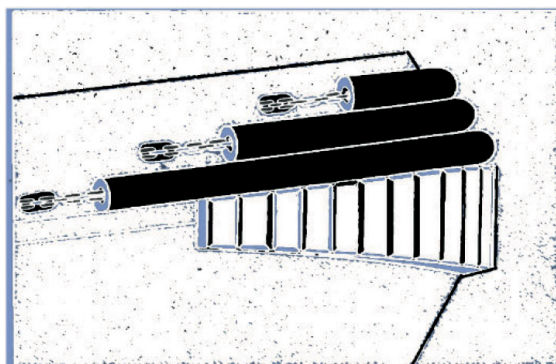


Рис. 3. Элементы кранцевой защиты носа буксира для работы на «укол» при высокой зыби

Носовые кранцы должны иметь большую поверхность контакта и радиус для того, чтобы снизить давление на корпус судна. Это же справедливо и для кормовых кранцев толкающих буксиров, так как для этого они используют свою корму. Кранцы из автомобильных покрышек часто используют в дополнение к кормовым и носовым кранцам, чтобы увеличить площадь соприкосновения, а также по бортам, так как в данном случае при повреждении их можно сравнительно легко заменить [4]. Материал кранца должен иметь высокий коэффициент трения, чтобы обеспечить положения кормы или бака буксира при толкании под углом к корпусу судна. Проскальзывание вдоль корпуса судна, причала, других буксиров, а также бортовая и килевая качка у борта судна, вызванная морским волнением, могут легко повредить кранцы буксира.

Во избежание раннего износа кранцевого ограждения (например, по бортам буксира или в местах, где контакт не требуется) могут использоваться кранцы с малым коэффициентом трения. Некоторые типы кранцевого устройства могут оснащаться системой подачи воды в зону контакта кранцев, что позволяет снизить коэффициент трения. Данный подход позволяет предотвратить повреждения кранцев, особенно при толкании судов с отвесными бортами при волнении моря. Такие устройства распространены, например, на буксирах в порту Гонг-Конга (рис. 4 [1]).



Рис. 4. Буксир «Лэм Тонг»

Еще одним важным фактором для обеспечения надежной кранцевой защиты является высота расположения носового кранца относительно воды. При толкании под углом к борту буксируемого

судна, имеющего передний или задний ход, гидродинамические силы, направленные на буксир, создают дополнительный кренящий момент, который проявляется образованием крена [5]. Чем выше расположен носовой кранец относительно поверхности воды, тем выше влияние на критерии устойчивости буксира.

Обсуждение(Discussion)

С практической точки зрения для выполнения производственных задач безэкипажным портовым буксиром могут быть использованы носовые элементы кранцевой защиты. На рис. 5 приведен вариант носового элемента кранцевой защиты цилиндрического типа указанного в табл. 1 размера. Носовые элементы кранцевой защиты цилиндрического типа часто используются в качестве носовых кранцев для работы буксира на укол.

а)



б)



в)

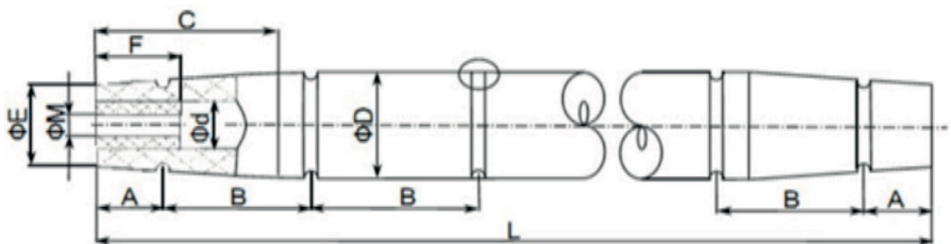


Рис. 5. Носовой элемент кранцевой защиты цилиндрического типа:
а — закреплен на буксире; б — общий вид; в — чертеж

Таблица 1

Размеры носового элемента кранцевой защиты цилиндрического типа

$\times d$	E	$A_{\max}$	$B_{\max}$	C	M	F	Вес, кг/м
600×300	450	300	800	900	125	500	305
500×250	375	400	750	900	100	500	195
200×100	170	200	335	500	75	300	35

Через центр таких кранцев проходит продольная цепь, кранцы по окружности дополнительно поддерживаются стропами или цепями, для которых предусмотрены канавки; подходят для установки на нос или корму безэкипажного портового буксира (рис. 5). *W*- и *M*-образные кранцы (рис. 6) имеют большие контактные поверхности с целью уменьшения давления на корпус. Рифленные поверхности обеспечивают отличное сцепление.

Вид этих кранцев предназначен для применения в условиях открытого моря. Гибкие опоры позволяют устанавливать по кривой, почти по всем изгибам корпуса. Устанавливаются в основном на ледоколах и морских буксирах. Малоприменимы для кранцевой защиты безэкипажного портового буксира. Привальный *D*-образный кранец широко используется для построения кранцевой защиты буксиров с борта и кормы. Бывают *D*-образного и круглого внутреннего диаметра (см. рис. 6 и табл. 2).

а)

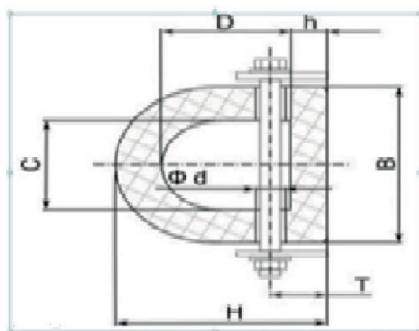


б)



Рис. 6. Элементы кранцевой защиты:
а — W-образные; б — М-образные кранцы

а)



б)

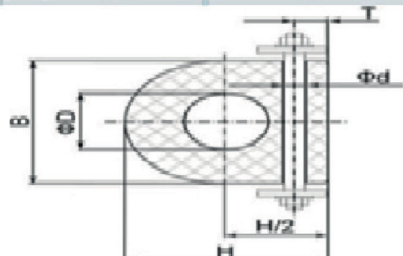


Рис. 7. Привальные кранцы:
а — D-образный диаметр; б — круглый диаметр

Таблица 2

Размеры элемента кранцевой защиты привальный брус

Размер, мм	Тип	Вес, кг
80 × 80 × 2000	DC-42	18
100 × 100 × 2000	DD-50	20
120 × 90 × 2000	DD-90×60	18
125 × 160 × 2000	DC-50	61
150 × 150 × 2000	DC-75	40
200 × 200 × 2000	DD-100	72
250 × 250 × 3000	DD-120	180
300 × 300 × 2000	DD-150	180
300 × 300 × 3000	DC-125	300
300 × 300 × 4000	DC-150	360
350 × 350 × 2000	DD-175	202
400 × 400 × 2000	DD-200	320
500 × 500 × 3000	DC200/250	600

Блочные кранцы, предназначенные для тяжелых условий эксплуатации, рассчитаны на большие нагрузки и применимы для усиления кранцевой защиты в критических местах (рис. 8).

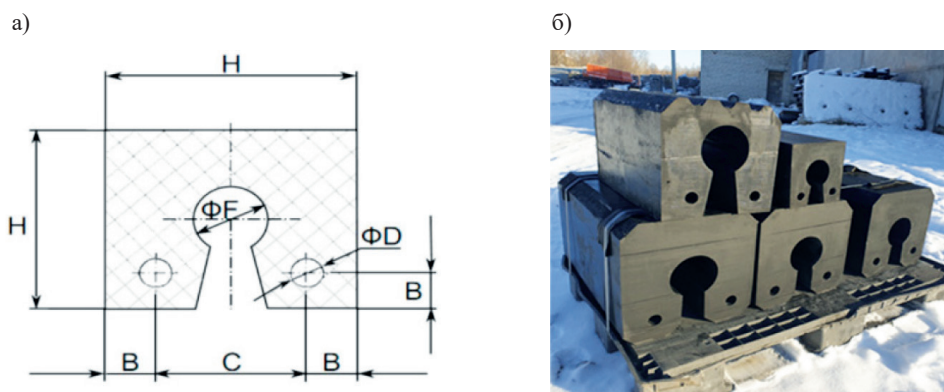


Рис. 8. Блочные кранцы: а — чертеж; б — фото

Кранцевая защита безэкипажного портового буксира может быть усилена с помощью кранцев изготовленных из автомобильных покрышек грузовиков, бывших в употреблении (рис. 9).



Рис. 9. Усиление кранцевой защиты в носовой части автомобильными покрышками

Рассмотренные ранее элементы кранцевой защиты буксиров могут быть использованы для построения кранцевой защиты безэкипажного портового буксира (рис. 10 и табл. 3). При выполнении производственной задачи безэкипажным портовым буксиром, как и традиционным буксиром, временами происходит повреждение элементов кранцевой защиты, что делает невозможным выполнение следующей производственной задачи вплоть до вывода буксира из эксплуатации [6], [7].

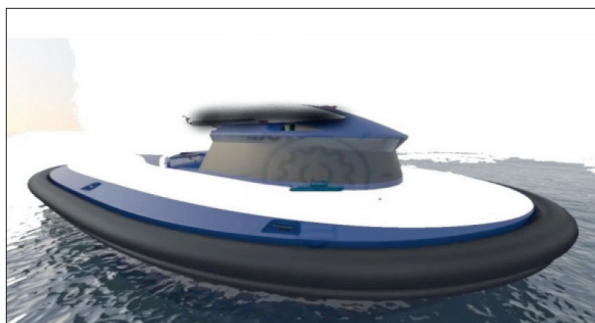


Рис. 10. Минимальная кранцевая защита безэкипажного буксира

**Размеры и варианты элементов кранцевой защиты
для безэкипажного портового буксира**

Безэкипажный буксир	Элементы кранцевой защиты							
	Носовой элемент кранцевой защиты цилиндрического типа							
	$\times d$	E	$A_{\max}$	$B_{\max}$	C	M	F	Вес, кг/м
	500 · 250	375	400	750	900	100	500	195
	Привальный D -образный кранец							
	Размер, мм		Тип			Вес, кг		
	200×200×2000		DD-100			72		
	Возможно усиление из кранцев, изготовленных из авиационных или автомобильных покрышек							
	Установка в критических местах соприкосновения с буксируемым объектом (носовая и бортовые части безэкипажного буксира)							



Рис. 11. Вариант временного решения при повреждении носового кранца

Многие элементы кранцевой защиты устанавливаются в заводских условиях, поэтому при серьезных повреждениях произвести должный ремонт у причала не представляется возможным. Вес кранцев, изготавливаемых из автомобильных покрышек грузовиков, составляет 100–300 кг. Для установки дополнительной кранцевой защиты из автомобильных покрышек (рис. 11) был использован кран с другого буксира.

Заключение

В работе проанализированы различные конструкции элементов кранцевой защиты, применяемых в настоящее время на портовых буксирах [8]–[12], что позволило структурировать основные возможности при выборе кранцевой защиты для безэкипажного портового буксира:

- 1) метод буксировки, например, с помощью буксирного троса или пуш-пул; будет ли буксир толкать кормой или носовой частью;
- 2) размер буксира и мощность двигателя являются важными факторами при расчете горизонтальной нагрузки и кинетической энергии, передаваемой во время работы с буксируемым объектом;
- 3) размер рабочей поверхности элементов кранцевой защиты с буксируемым объектом;

4) тип и размер буксируемых судов, например, с большим развалом носовых шпангоутов или нависающей кормой. Буксирам в таких случаях необходима дополнительная защита верхней части бака во избежание повреждения обоих судов при работе на укол;

4) погодные условия, такие как волны и зыбь, создадут дополнительную нагрузку на кранцы, что должно быть учтено конструкцией кранцевой защиты безэкипажного портового буксира;

5) устройство кормы и бака безэкипажного портового буксира.

Создание эффективной кранцевой защиты для безэкипажного портового буксира представляется возможным с учетом рассмотренных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tug Use in Port: A Practical Guide*. — 2nd edition. — The Nautical institute, 2003. — 174 p.
2. Зеленков Г. А. Проблемы создания беспилотных портовых буксиров-кантовщиков и концептуальные пути их решения / Г. А. Зеленков, В. В. Устинов, Л. М. Лопатин // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 4–3 (46). — С. 111–119.
3. Данилов О. О. Особенности реализации без экипажной схемы управления морским портовым буксиром / О. О. Данилов, В. В. Каретников, Я. В. Косяк // *Символ науки*. — 2019. — № 4. — С. 38–40.
4. Питерский Б. П. Метод управления группой однотипных безэкипажных буксиров в задаче буксировки судна с использованием нечеткой логики / Б. П. Питерский, А. И. Яшин // *Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ*. — 2020. — № 4. — С. 18–22.
5. Пат. 173479 Российская Федерация, МПК В63В 35/08, В63В 35/10. Портовый буксир с ледовыми зубьями и резонансными вертикальными колебаниями корпуса для разрушения льда / Ю. А. Чашков, Р. Ю. Чашков; заяв. и патентообл. Ю. А. Чашков, Р. Ю. Чашков. — № 2017108179; заявл. 13.03.2017, опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25.
6. Егоров Г. В. Мелкосидящий ледокольный буксир для «норильского никеля» / Г. В. Егоров, О. А. Кардаш, Н. В. Автутов // *Судостроение*. — 2010. — № 5 (792). — С. 9–14.
7. Устинов В. В. Вопросы подготовки и дипломирования капитанов буксирных судов / В. В. Устинов, Э. Э. Субанов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2020. — № 1(94). — С. 18–31. DOI: 10.34046/aumsuomt94/4.
8. Изотов О. А. Организация работы буксирной компании на акватории порта «Большой порт Санкт-Петербург» / О. А. Изотов // *Системный анализ и логистика*. — 2020. — № 2 (24). — С. 3–12.
9. Герасимова А. А. Практические аспекты оценки стоимости морских и речных судов / А. А. Герасимова, Т. В. Учинина // *Современные проблемы науки и образования*. — 2014. — № 3. — С. 309.
10. Гуров П. В. Управляемость буксирного состава в сложных путевых и метеорологических условиях: дис. ... канд. техн. наук / П. В. Гуров. — Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2013. — 179 с.
11. Котков С. А. Выбор судна-прототипа для проектирования сибирского буксира-толкача / С. А. Котков // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. — 2017. — № 1–2. — С. 26–29.
12. Киреев В. Н. Буксиры проектам ЦКБ «Балтсудопроект» / В. Н. Киреев, Е. С. Былинович, Ю. И. Рязанцев // *Судостроение*. — 2007. — № 3 (772). — С. 25–29.

REFERENCES

1. *Tug Use in Port: A Practical Guide*. 2nd edition. The Nautical institute, 2003.
2. Zelenkov, Gennady A., Victor V. Ustinov, and Mikhail S. Lopatin. “Problems of creation of unmanned port tugs and conceptual ways of solving them.” *Marine intellectual technologies* 4–3(46) (2019): 111–119.
3. Danilov, O. O., V. V. Karetnikov, and Ya. V. Kosyak. “Osobennosti realizatsii bez ekipazhnoi skhemy upravleniya morskim portovym buksirov.” *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* 4 (2019): 38–40.
4. Peterskiy, Boris Pavlovich, and Aleksandr Ivanovych Yashin. “A control method for a group of the same type of crewless tugs in the task of towing a vessel using fuzzy logic.” *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University* 4 (2020): 18–22.
5. Chashkov, Yu. A., and R. Yu. Chashkov. RU 173479 U1, IPC B63B 35/08, B63B 35/10. Portovyi buksir s ledovymi zub'yami i rezonansnymi vertikal'nymi kolebaniyami korpusa dlya razrusheniya l'da. Russian Federation, assignee. Publ. 29 Aug. 2017.

6. Egorov, G. V., O. A. Kardash, and N. V. Avtutov. "Shallow draught tug for "Norilsk Nickel"." *Shipbuilding* 5(792) (2010): 9–14.
7. Ustinov, V. V., and E. E. Subanov. "Issues of training and certification of tugboat captains." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(94) (2020): 18–31. DOI: 10.34046/aumsuomt94/4.
8. Izotov, Oleg Al'bertovich. "Organization of the work of the towing company at the port area "Bol'shoj port of St. Petersburg"." *Sistemnyi analiz i logistika* 2(24) (2020): 3–12.
9. Gerasimova, A. A., and T. V. Uchinina. "Practical aspects of valuation sea and river vessels." *Modern problems of science and education* 3 (2014): 309.
10. Gurov, P. V. *Upravlyaemost' buksirnogo sostava v slozhnykh putevykh i meteorologicheskikh usloviyakh*. PhD diss. N. Novgorod: NGTU im. RE Alekseeva, 2013.
11. Kotkov, S. A. "Selection of the prototype vessel for designing the Siberian towing-potential." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1–2 (2017): 26–29.
12. Kireev, V. N., E. S. Bylinovich, and Yu. I. Ryazantsev. "Tugs constructed under the TSKB Baltsudoproekt's projects." *Shipbuilding* 3(772) (2007): 25–29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Данилов Олег Олегович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: oleg-danelov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Danilov, Oleg O. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: oleg-danelov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 октября 2022 г.
Received: October 27, 2022.

THE SELECTION OF THE CONTROL UNIT OPTIMAL SIGNALLING SEQUENCE IN CONTAINERS STACK HANDLING AT SEA PORT TERMINAL

E. E. Soloveva¹, T. E. Malikova²

¹ — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The possibility of increasing the productivity of technological operations performed in the storage area of a container terminal due to the introduction of automation elements into mechanized warehouse cargo handling has been researched. As one of the possible automation options, a method for transporting and storing containers with the implementation of a loader control unit in the form of a deterministic finite automaton is proposed. The sequence of actions of the loader is simulated in the control unit by a line of encoded symbols generated by the transition diagram of the Mealy automaton. In this case, the transition diagram is an automatic programming tool allowed mathematically describing the logic of controlling the actions of the loader when it processes a stack of containers. As a result of generation at the output of the machine, several valid loader control lines are got. Each symbol of the control line corresponds to one action from the loader working cycle. It is required to find the control line that will bring the loader to the state, when the picking up of containers from the stack is completed, in the minimum number of actions. The object of the research is a variable sequence of loader actions during partial disassembly of the stack with its corresponding control line. To reduce the complexity of the task being solved, each control line is divided into sections consisting of symbols responsible for the following actions of the loader: moving when changing the disassembled row, disassembling the row with the picking up and movement of target containers, returning blocking containers to the stacks where they were initially placed. As a result of the comparison of the corresponding symbolic sections of different lines, an algorithm that allows choosing the optimal sequence of signals for the control unit of the technological automaton in terms of the number of symbols is developed.

Keywords: container terminal, technological automaton, production process control, transshipment equipment, automation, mechanized cargo handling.

For citation:

Soloveva, Ekaterina E., and Tatiana E. Malikova. "The selection of the control unit optimal signalling sequence in containers stack handling at sea port terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 426–436. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-426-436.

УДК 004.8:656.073.28

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИГНАЛОВ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ШТАБЕЛЯ КОНТЕЙНЕРОВ НА МОРСКОМ ТЕРМИНАЛЕ

Е. Е. Соловьева¹, Т. Е. Маликова²

¹ — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
г. Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Российская Федерация

Исследована возможность повышения производительности технологических операций, выполняемых в зоне хранения контейнерного терминала за счет внедрения в механизированную складскую грузопереработку элементов автоматизации. В качестве одного из возможных вариантов автоматизации предложен способ транспортирования и складирования контейнеров с реализацией блока управления погрузчиком в виде детерминированного конечного автомата. Последовательность действий погрузчика имитирована в блоке управления строкой кодированных символов, генерируемой посредством диаграммы переходов автомата Мили. В данном исследовании диаграмма переходов, являясь, по своей сути, инструментом автоматного

программирования, математически описывает логику управления действиями погрузчика при обработке им штабеля контейнеров. В результате генерации на выходе автомата получено несколько допустимых строк управления погрузчиком. Каждый символ строки управления соответствует одному действию из рабочего цикла погрузчика. Необходимо найти ту строку управления, которая при выполнении минимального количества действий приведет погрузчик в такое состояние, когда выемка контейнеров из штабеля завершена. Объектом исследования являлась вариативная последовательность действий погрузчика при частичном разборе штабеля с соответствующей ей строкой управления. Для снижения трудоемкости решаемой задачи каждая строка управления была разбита на участки, состоящие из символов, отвечающих за следующие действия погрузчика: перемещение при смене разбираемого ряда, разбор ряда с выемкой и перемещением целевых контейнеров, возврат блокирующих контейнеров в стеки, где они изначально размещались. В результате сравнительного сопоставления соответствующих символьных участков разных строк разработан алгоритм, позволяющий выбирать оптимальную по количеству символов последовательность сигналов для блока управления технологического автомата.

Ключевые слова: контейнерный терминал, технологический автомат, управление производственным процессом, перегрузочное оборудование, автоматизация, механизированная грузопереработка.

Для цитирования:

Соловьева Е. Е. Выбор оптимальной последовательности сигналов блока управления при обработке штабеля контейнеров на морском терминале / Е. Е. Соловьева, Т. Е. Маликова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 426–436. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-426-436.

Введение (Introduction)

Морские контейнерные перевозки являются одним из наиболее удобных и экономически выгодных способов доставки грузов на большие расстояния с перевалкой их на смежные виды транспорта [1]. При этом контейнерные терминалы порта играют решающую роль в качестве интермодальных интерфейсов и действуют не только как связующий узел с другими видами внутреннего транспорта, но и при необходимости оказывают услуги временного хранения импортных грузопотоков, требующих выполнения в отношении них таможенных формальностей [2], [3]. Основными функциями любого терминала морского порта и контейнерного, в частности, являются: передача грузопотоков между различными видами транспорта, преобразование формы грузопотока, согласование размеров партий сопрягаемых видов транспорта, демпфирование неравномерности работы транспорта, коммерческое хранение грузов, логистическая доработка грузов [4]. Исходя из этих функций основная нагрузка перераспределения грузопотоков приходится на зону хранения [5]. С учетом того, что перевалочный потенциал многих российских портов ограничен невозможностью строительства и расширения терминалов и складов, низкой скоростью обслуживания даже незначительного числа судов одновременно, а также пропускной способностью железной дороги количество одновременно хранимых контейнеров будет только увеличиваться. Поэтому решение задачи наращивания перевалочного потенциала контейнерного терминала через повышение производительности технологических операций, выполняемых в зоне хранения, является актуальной для развития наземной инфраструктуры портов и имеет практическую направленность, что подтверждено в том числе современными исследованиями в данной области [6]–[9].

Известно, что структура общего грузопотока, проходящего через зону хранения контейнерного терминала, сформирована из частных грузопотоков различной природы: груженные и порожние контейнеры, импортные и экспортные, универсальные и специальные, растариваемые и затариваемые тарно-штучные грузы и др. Для каждого из этих грузопотоков является характерным собственный технологический маршрут обработки со своей индивидуальной последовательностью операционных звеньев и задействованного в них оборудования [10], [11]. Однако все эти частные грузопотоки объединяет наличие в любом из технологических маршрутов двух обязательных операций формирования и расформирования штабелей в складской зоне [12]. Ежедневно на терминал поступают заявки на выемку из штабеля контейнеров, предназначенных для различных целей, таких как погрузка на смежное транспортное средство, выдача грузополучателю, таможенный осмотр / досмотр

и т. д. Удовлетворение заявок связано с определенными трудностями, неизбежно возникающими в технологическом звене во время обработки штабеля временного хранения [13]. Во-первых, сложность выемки необходимого контейнера, если он находится не в верхних ярусах штабеля, или размещения в штабеле прибывающих на склад контейнеров в соответствии теми или иными правилами их укладки [14], [15]. Во-вторых, на производительность в этом звене сильное воздействие оказывает человеческий фактор, а именно квалификация диспетчера, формирующего задания, и оператора, выполняющего это задание, при этом возможность принятия человеком алогичных решений в конкретных ситуациях составляет более 75 % [16], [17].

Минимизировать человеческие ошибки можно за счет внедрения в механизированную складскую грузопереработку элементов автоматизации [18] в рамках создания системы управления и мониторинга грузопотоков, проходящих через морской терминал [19], [20]. В качестве одного из возможных вариантов автоматизации предложен способ транспортирования и складирования контейнеров с реализацией блока управления погрузчиком в виде автомата Мили [21]. Результаты моделирования отдельных элементов блока управления погрузчиком (диаграммы переходов и сам процесс управления действиями погрузчика через последовательность кодированных сигналов) опубликованы в работах [22], [23]. Работа автомата Мили при генерации последовательности управляющих сигналов рассмотрена в статье [24]. Следует отметить, что в результате генерации получено несколько альтернативных строк управления (последовательностей управляющих сигналов), которые приводят к правильному выполнению операций по формированию и расформированию штабеля с целевыми контейнерами. При этом возникает вопрос: «Какую из альтернативных строк управления выбрать как окончательный вариант для системы управления погрузчиком?».

Целью данного научного исследования является обоснование понятия «оптимальная работа» для системы автоматического управления.

Методы и материалы (Methods and Materials).

По своей сути каждый символ строки управления соответствует одному движению погрузчика, поэтому в качестве оптимальной необходимо выбрать строку, которая имеет наименьшую длину. Иными словами, поиск множества всех возможных строк управления для конкретного набора целевых контейнеров, подсчет количества символов в каждой из них и выбор минимального числа из полученных, приведет к цели, т. е. к нахождению *оптимальной строки управления*. Не вызывает сомнения, что увеличение количества элементов в наборе целевых контейнеров приводит к добавлению возможных вариантов для строки управления и тем самым усложняет поиск оптимальной строки управления методом простого перебора альтернативных возможностей расформирования штабеля. Для снижения трудоемкости решаемой задачи следует рассмотреть, из каких участков состоит строка управления и на каких из них возможно сокращение длины участка (количества его символов).

Известно, что для оценки трудоемкости выборки контейнеров при различных транспортно-технологических схемах работы терминала использовалось понятие *производительных и непроизводительных* движений погрузчика [25]. Контейнеры, которые должны быть выбраны в определенный момент времени, так называемые *целевые контейнеры*, находятся в одной из ячеек штабеля (на рис. 1 показано серым цветом). Доступ к некоторым из них затруднен контейнерами (блокирующими), расположенными в том же стеке выше целевого контейнера и / или в стеке, находящемся перед стеком с целевым контейнером. За производительное движение для одного контейнера принимается лишь одно движение: выемка из штабеля целевого контейнера, так как только оно оплачивается оператору терминала. Все движения погрузчика в отношении блокирующих контейнеров считаются непроизводительными (оплата за них не поступает). Таким образом, определить трудоемкость выемки одного контейнера из штабеля можно как отношение одного производительного движения к общему количеству движений, в течение которых погрузчик вынимает целевой контейнер из штабеля, т. е. иными словами, селективность контейнера вычисляется по следующей формуле:

$$s = \frac{1}{N_{\text{дв}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{дв}}$ — все движения погрузчика (производительные и непроизводительные).

При необходимости изъятия из штабеля n целевых контейнеров селективность их выемки находится по следующей формуле:

$$s = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{пр}} + N_{\text{нпр}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{пр}}$ — количество производительных (оплачиваемых оператору терминала) движений;

$N_{\text{нпр}}$ — количество непроизводительных движений.

Так как количество производительных движений погрузчика равно количеству целевых контейнеров, предложенных в данный момент времени к выемке, увеличить значение параметра селективности (2) можно лишь уменьшив количество непроизводительных движений.

Как отмечалось ранее, непроизводительные движения — это выемка из штабеля блокирующих контейнеров с последующим их возвратом в штабель после перемещения всех целевых контейнеров к месту их назначения (убытие морским, железнодорожным или автомобильным транспортом, выполнение таможенных формальностей и т. п. [26]). Следовательно, можно предположить, что прежде всего необходимо научиться выделять в строке управления участки «выемки блокирующих контейнеров», так как именно в них заложен потенциал сокращения количества символов управляющей строки.

Результаты (Results)

Подтвердим или опровергнем выдвинутую нами гипотезу о возможности сокращения символов строки управления за счет минимизации непроизводительных движений погрузчика при расформировании штабеля на конкретном примере. Предположим, что это утверждение верно для штабеля любой размерности и любого количества целевых контейнеров, предложенных в данный момент времени к выемке.

Рассмотрим частный случай, например, штабель, следующей размерности: девять продольных рядов, шесть поперечных и пять ярусов, с размещением в нем целевых контейнеров, как показано на рис. 1.

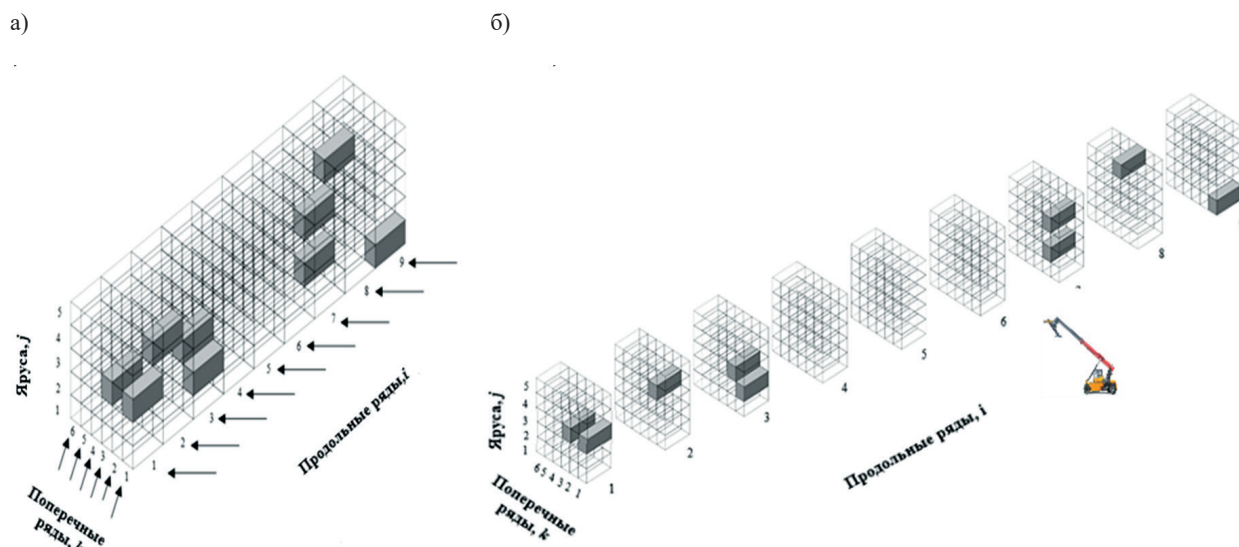


Рис. 1. Контейнерный штабель:
а — размерность и расположение целевых контейнеров;
б — продольные ряды с целевыми контейнерами

Пусть на терминал поступила заявка на выемку девяти целевых контейнеров, местоположение которых в штабеле (показано на рис. 1 серым цветом) задано координатами $(i; j; k)$: $(1; 3; 1)$, $(1; 3; 3)$, $(2; 2; 2)$, $(3; 4; 1)$, $(3; 3; 2)$, $(7; 2; 2)$, $(7; 4; 2)$, $(8; 1; 3)$, $(9; 5; 1)$.

Для выемки целевого контейнера погрузчик выполняет ряд последовательных повторяющихся операций, каждой из которых в строке управления соответствует определенный символ. В табл. 1 приведены используемые в строке символы и соответствующее им действия погрузчика.

Таблица 1

Расшифровка символьных обозначений последовательности операций, выполняемых погрузчиком

Символьное обозначение операции	Выполняемое действие
•	Перемещение вдоль продольного ряда на один шаг вправо
■	Перемещение вдоль продольного ряда на один шаг влево
×	Снятие контейнера в продольном ряду
v	Снятие контейнера из поперечного ряда
-	Вывоз контейнер во вспомогательный штабель
○	Постановка блокирующего контейнера в исходный стек
★	Постановка контейнера в продольный ряд
◇	Перемещение на один стек вглубь штабеля
⊙	Перемещение на один стек назад

Искомые контейнеры расположены в первом – третьем, седьмом – девятом продольных рядах (рис. 1, б). Рассмотрим те участки строки, которые содержат сигналы (коды) управления действиями погрузчика при выемке блокирующих и целевых контейнеров с последующим возвратом блокирующих контейнеров обратно в соответствующие им стеки (табл. 2).

Таблица 2

Участки строки управления, отвечающие за выемку целевых контейнеров из штабеля

Порядковый номер, разбираемого ряда / S_i участок строки	Координаты $(i; j; k)$ целевых контейнеров, находящихся в i -м продольном ряду	Последовательность управляющих сигналов:			Длина S_i участка
		Выемка первого целевого контейнера	Выемка второго целевого контейнера	Возврат блокирующих контейнеров на прежнее место	
1-й продольный ряд / S_1	$(1; 3; 1)$, $(1; 3; 3)$	xxx -	xx ◇ v v v v v ◇ v v v -	oo ⊙ooooo ⊙ ★★★★★	30
2-й продольный ряд / S_2	$(2; 2; 2)$	xxxxx ◇ v v -	-	o ⊙ ★★★★★	16
3-й продольный ряд / S_3	$(3; 4; 1)$, $(3; 3; 2)$	xxxxx -	x ◇ v v v -	oo ⊙ ★★★★★	18
7-й продольный ряд / S_7	$(7; 2; 2)$, $(7; 4; 2)$	xxxxx ◇ v v -	v v -	oo ⊙ ★★★★★	20
8-й продольный ряд / S_8	$(8; 1; 3)$	xxxxx ◇ v v v v v ◇ v -	-	⊙ooooo ⊙ ★★★★★	26
9-й продольный ряд / S_9	$(9; 5; 1)$	xxxxx -	-	★★★★★	10
Сумма					120

В строке управления последовательности из двух символов вида (× -) и (v -) указывают на выполнение операции выемки целевого контейнера из штабеля (выемка из продольного или поперечного ряда соответственно). В табл. 2 они выделены серым цветом. Количество таких последовательностей (в данном примере их девять) равно количеству производительных операций. Остальные символы строки управления отвечают за непроизводительные операции. Поскольку местоположение целевых и блокирующих их контейнеров в штабеле неизменно в момент его расформирования, количество производительных движений, как и непроизводительных (выемка блокирующих контейнеров), при любой последовательности разбора продольных рядов штабеля не меняется, т. е. уменьшить количество символов на рассмотренных участках строки управления не представляется возможным.

Попробуем уменьшить количество символов в строке управления за счет изменения последовательности (очередности) разбора продольных рядов штабеля. Предположим, что на момент поступления заявки на вывоз контейнеров погрузчик (ричстакер) находится у шестого продольного ряда. Если бы в этом ряду находились целевые контейнеры (рис. 1, б), ряд был бы разобран, но так как их там нет, то погрузчик должен быть перемещен влево или вправо до совмещения с рядом, в котором эти контейнеры находятся. Варианты возможных перемещений погрузчика вдоль поперечного ряда с последовательностью разбора продольных рядов и соответствующая строка управления приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Структура строки управления в зависимости
от последовательности разбора продольных рядов**

№ п/п.	Варианты последовательности разбора продольных рядов	Участок строки, ответственный за перемещение погрузчика вдоль первого поперечного ряда вправо или влево / участок строки, разбирающий <i>i</i> -й продольный ряд /	Длина строки управления		
			Суммарная длина участков перемещения	Суммарная длина участков выемки	Сумма
1	1-й, 2-й, 3-й, 7-й, 8-й, 9-й ряды	■■■■■ / $S_1/\bullet / S_2/\bullet / S_3/\bullet \bullet \bullet \bullet /$ $S_7/\bullet / S_8/\bullet / S_9/$	13	120	133
2	3-й, 2-й, 1-й, 7-й, 8-й, 9-й ряды	■■■■ / $S_3/\bullet / S_2/\bullet / S_1/\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet /$ $S_7/\bullet / S_8/\bullet / S_9/$	13	120	133
3	1-й, 2-й, 3-й, 9-й, 8-й, 7-й ряды	■■■■■ / $S_1/\bullet / S_2/\bullet / S_3/\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet /$ $S_9/\bullet / S_8/\bullet / S_7/$	15	120	135
4	7-й, 8-й, 9-й, 1-й, 2-й, 3-й ряды	$\bullet / S_7/\bullet / S_8/\bullet / S_9/$ ■■■■■■■■ / $S_1/\bullet / S_2/\bullet / S_3/$	13	120	133
5	8-й, 7-й, 9-й, 3-й, 2-й, 1-й ряды	$\bullet \bullet / S_8/\bullet / S_7/\bullet \bullet / S_9/$ ■■■■■■■■ / $S_3/\bullet / S_2/\bullet / S_1/$	13	120	133
6	3-й, 7-й, 2-й, 8-й, 1-й, 9-й ряды	■■■■ / $S_3/\bullet \bullet \bullet \bullet / S_7/$ ■■■■■■ / $S_2/\bullet$ $\bullet \bullet \bullet \bullet / S_8/$ ■■■■■■■■ / $S_1/\bullet \bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet \bullet / S_9/$	33	120	153
7	7-й, 3-й, 8-й, 2-й, 9-й, 1-й ряды	$\bullet / S_7/$ ■■■■■■ / $S_3/\bullet \bullet \bullet \bullet / S_8/$ ■■■■■■■ / $S_2/\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet / S_9/$ ■■■■■■■■■ / $S_1/$	31	120	151
8	7-й, 8-й, 9-й, 3-й, 2-й, 1-й ряды	$\bullet / S_7/\bullet / S_8/\bullet / S_9/$ ■■■■■■■■ / $S_3/$ ■■■ / $S_2/\bullet / S_1/$	12	120	132
9	2-й, 3-й, 1-й, 7-й, 8-й, 9-й ряды	■■■■■ / $S_2/\bullet / S_3/\bullet / S_1/\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet /$ $S_7/\bullet / S_8/\bullet / S_9/$	15	120	135
10	8-й, 9-й, 7-й, 3-й, 2-й, 1-й ряды	$\bullet \bullet / S_8/\bullet / S_9/$ ■■■ / $S_7/$ ■■■■■■ / $S_3/\bullet /$ $S_2/\bullet / S_1/$	11	120	131

Получается, что у строки управления 10 наименьшая длина (131 символ) среди всех рассмотренных в табл. 3 вариантов. Суммарная длина участков, управляющих расформированием штабеля с последующим возвратом в него блокирующих контейнеров, для всех вариантов очередности разбора продольных рядов одинаковая (120 символов). Изменяется суммарная длина участков, управляющих перемещением погрузчика влево или вправо вдоль первого поперечного ряда. Диапазон изменений — от 33 символов до 11 (наименьшее значение соответствует управляющей строке № 10).

Промежуточные выводы:

1. Оптимальной строкой управления для рассмотренного примера является строка 10, соответствующая ей последовательность разбора продольных рядов — 8, 9, 7, 3, 2, 1.

2. Выдвинутая гипотеза о возможности сокращения символов строки управления за счет минимизации непроизводительных движений погрузчика при расформировании штабеля неверна, так как количество управляющих символов сокращается на участках, управляющих перемещениями погрузчика к следующему разбираемому ряду.

Обсуждение (Discussion)

Понятие оптимизации технологических процессов связано с вопросами: «*Что в конкретном случае понимать под термином «оптимальный процесс?» и «Как оценить степень оптимальности технологического процесса?»*». В методах оптимизации существует понятие *критерия оптимальности* как доказательной базы, свидетельствующее о том, что наилучшее решение (оптимальный план) найдено и дальнейшее улучшение технологического процесса невозможно. В качестве критериев оптимальности традиционно используются: максимальная производительность, максимальный (минимальные) доход (расходы), минимальное время, потраченное на выполнение комплекса операций, минимальное расстояние, которое проходит техника в процессе выполнения складских операций.

В данном исследовании первоначально поиск оптимальной строки управления (минимальной длины) осуществлялся через минимизацию количества непроизводительных движений погрузчика селективным выбором контейнеров из штабеля. Иными словами, стремились увеличить производительность технологического процесса (максимизация производительности погрузчика). Доказали, что повышение производительности для рассмотренного технологического процесса не равно минимизации количества непроизводительных движений погрузчика, так как показатель селективности (1) для этого процесса всегда равен константе. Далее была выполнена попытка поиска оптимальной строки управления изменением последовательности очередности разбора продольных рядов с целевыми контейнерами. Изменение этой последовательности заставляет погрузчик каждый раз проходить разное расстояние при разборе штабеля, т. е. в качестве критерия оптимальности использовалось расстояние, измеряемое в количествах перемещений (количество шагов) влево и вправо вдоль первого поперечного ряда. За одно перемещение (один шаг) принимали смещение погрузчика на один ряд, т. е. длину одного контейнера. Следовательно, согласно общепринятой классификации (теории оптимизации), был применен *критерий минимизации расстояния*. Было доказано, что при изменении последовательности в очередности разбора продольных рядов можно добиться уменьшения количества управляющих символов в строке. Напомним, что каждый символ строки управления равен одной операции, которую выполняет погрузчик (см. табл. 1), т. е. с уменьшением количества символов уменьшается количество операций, выполняемых погрузчиком, и, как следствие, повышается производительность последнего. В данном случае расстояние может быть принято за меру оптимальности рассматриваемого технологического процесса, но это не точная оценка.

Поясним данный вывод. Критерий минимального расстояния широко применяется в складской грузопереработке и методика его использования представлена, например, в [18]). Вернемся к примеру, приведенному на рис. 1. Погрузчик находится у шестого продольного ряда. Ближайший продольный ряд с целевыми контейнерами к шестому по критерию расстояния седьмой, следовательно, он будет разбираться первым. После выполнения операций по выемке целевых контейнеров из седьмого ряда ближайшим к погрузчику по критерию расстояния окажется восьмой,

затем девятый, третий, второй и первый ряды (рис. 1, б). Получили «оптимальную» последовательность разбора продольных рядов по критерию расстояния {7, 8, 9, 3, 2, 1}. Этой последовательности соответствует 8-я строка табл. 3 с управляющей строкой, состоящей из 132 символов (на один символ больше, чем у управляющей строки для последовательности {8, 9, 7, 3, 2, 1}). Нашли строку, у которой длина меньше, чем у управляющей строки соответствующей последовательности {7, 8, 9, 3, 2, 1}. Следовательно, доказано, что принцип каждый раз перемещать погрузчик к ближайшему от его месторасположения ряду с целевыми контейнерами не всегда приводит к желаемому результату, т. е. минимальному пробегу перегрузочного оборудования.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выбор оптимальной последовательности сигналов блока управления при обработке штабеля контейнеров требует количественного анализа не всей последовательности символов (кодов) управляющей строки, а сравнительно коротких ее участков.

2. Строка управления состоит из следующих участков: перемещение погрузчика вправо / влево вдоль первого поперечного ряда штабеля; разблокировка целевого контейнера (выемка из стека блокирующих контейнеров); выемка целевого контейнера с последующим вывозом к новому месту его размещения на терминале (например, возле железнодорожных путей); возврат блокирующих контейнеров в стеки, в которых они ранее находились. В принятых обозначениях (см. табл. 1) повторение символа • или символа ■■ либо только один из этих символов указывает на участок «перемещение погрузчика вправо / влево». На участок «разблокировка целевого контейнера» указывает последовательность символов ×. Если в строке управления встречается сочетание двух символов «×-» подряд, то выполняется «выемка целевого контейнера». Для участков «возврат блокирующих контейнеров в стеки» характерно чередование символов {○, ⊙, ⊙, ★★}.

3. Если минимизация количества символов в строке управления возможна лишь на участках «перемещение погрузчика вправо / влево», то необходимо организовать поиск последовательностей, состоящих только из символов • и ■■, а также подсчет количества этих символов. Та строка, в которой количество таких символов будет наименьшим, является оптимальной строкой управления. Поиск оптимальной строки в блоке управления погрузчиком как технологическим автоматом легко реализовать, используя для этого математический аппарат теории автоматов, языков и вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Контейнеризация как очередной этап развития транспортных систем / А. В. Галин, Е. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 996–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-996-1003.

2. Янченко А. А. Алгоритм оформления судна в порту по технологии предварительного информирования таможенных органов в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, А. В. Кузьмин // Территории опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации и свободный порт Владивосток: сб. науч. тр. X Регион. науч. конф., посв. 25-летию ФТС России. — Владивосток: Владивостокский филиал Российской таможенной академии, 2016. — С. 257–262.

3. Маликова Т. Е. Организация таможенного контроля на контейнерных терминалах в морских пунктах пропуска / Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: FERBAT-13: материалы юбилейной десятой международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию адмирала Г. И. Невельского. — Владивосток: Российская академия транспорта, Дальневосточное отделение, 2013. — С. 81–83.

4. Валькова С. С. Изменение роли грузового склада морского порта в современных транспортно-логистических сетях товаропродвижения / С. С. Валькова // Транспортное дело России. — 2018. — № 3. — С. 110–113.

5. Валькова С. С. Предпосылки создания новых методов расчета параметров обобщенного склада морского порта / С. С. Валькова // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли: Материалы

IV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Владивосток: Дальрыбвтуз, 2018. — С. 257–263.

6. Эглит Я. Я. Анализ логистических процессов в порту / Я. Я. Эглит, К. Я. Эглите, Ю. А. Соломатина, Е. П. Мыльникова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 4 (101). — С. 3–6.

7. Янченко А. А. Дискретно — событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 25–31.

8. Тэк Е. Л. Имитационное моделирование и оценка перерабатывающей способности элементов транспортного узла Пусан / Е. Л. Тэк, Р. Г. Король // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2022. — № 3 (75). — С. 171–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).171–180.

9. Коробкова М. Н. Оценка влияния технологии выполнения портовых операций на качество услуг морских портов / М. Н. Коробкова // Экономика и предпринимательство. — 2022. — № 2 (139). — С. 1227–1230. DOI: 10.34925/EIP.2022.139.2.245.

10. Кузнецов А. Л. Математическое описание задачи анализа пропускной способности морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Р. В. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.

11. Антонова Е. И. Использование системы планирования перегрузочных процессов в работе контейнерного терминала / Е. И. Антонова, И. А. Васильев // Эксплуатация морского транспорта. — 2019. — № 2 (91). — С. 3–8. DOI: 10.34046/aumsuomt91/1.

12. Kurniawan F. Container Movement Evaluation Using System Dynamics Simulation / F. Kurniawan, S. N. Musa, N. H. Moin // 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). — IEEE, 2020. — Pp. 37–42. DOI: 10.1109/IEEM45057.2020.9309883.

13. Соловьева Е. Е. Исследование подходов в разработке алгоритмов управления автоматизированной системой организации поиска и выемки контейнеров / Е. Е. Соловьева // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития / Материалы Пятой международной научно-технической конференции. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2022. — С. 70–74.

14. Кузнецов А. Л. Моделирование погрузоразгрузочных работ на контейнерном терминале / А. Л. Кузнецов, Е. А. Давыденко // Транспортное дело России. — 2022. — № 2. — С. 205–207. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_205.

15. Lersteau C. Solving the problem of stacking goods: mathematical model, heuristics and a case study in container stacking in ports / C. Lersteau, T. T. Nguyen, T. T. Le, H. N. Nguyen, W. Shen // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 25330–25343. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052945.

16. Филиппова А. И. Человеческий фактор как одна из основных причин аварийности российского торгового флота / А. И. Филиппова, Т. Е. Маликова, А. Ж. Радочинская // Проблемы транспорта Дальнего Востока: материалы одиннадцатой Международной научно-практической конференции: FEBRAT-2015; Дальневосточное отд. Российской Академии транспорта, Администрация Приморского края, Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского. — Владивосток: Дальневосточное отд. Российской Академии транспорта, 2015. — С. 50–52.

17. Ганнесен В. В. Человеческий фактор как одна из основных причин аварийности / В. В. Ганнесен, Е. Е. Соловьева // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2022. — Т. 61. — № 3. — С. 64–69.

18. Маликова Т. Е. Склады и складская логистика / Т. Е. Маликова. — М.: ООО «Издательство ЮРАЙТ», 2021. — 157 с.

19. Маликова Т. Е. Разработка системы слежения за импортными грузопотоками, оформляемыми по технологии предварительного информирования в морском пункте пропуска / Т. Е. Маликова, А. И. Филиппова // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 4–2 (34). — С. 32–36.

20. Филиппова А. И. Разработка системы мониторинга состояния скоропортящегося груза при морских контейнерных перевозках / А. И. Филиппова, Е. Б. Осокина, А. Ж. Радочинская // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 31–35.

21. Заявка на патент 2023106450/11(014007) Российская Федерация, МПК В65G 60/00, В65G 59/02. Способ транспортирования и складирования контейнеров / Т. Е. Маликова, Е. Е. Соловьева, В. В. Миханов; заяв. и патентообл. Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; заявл. 20.03.2023. — 25 с.

22. Маликова Т. Е. Детерминированный конечный автомат поиска контейнеров в штабеле / Т. Е. Маликова, Е. Е. Соловьева, А. Ж. Радочинская // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 4 (105). — С. 91–100.

23. Радочинская А. Ж. Модель формирования для таможенных целей вспомогательного штабеля контейнеров на языке конечных автоматов / А. Ж. Радочинская, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 2 (99). — С. 59–66.

24. Radochinskaia A. Z. Provability of dangerous goods segregation algorithm description using finite state-machine description language / A. Z. Radochinskaia, T. E. Malikova, A. Y. Strelkov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE, 2021. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470722.

25. Кузнецов А. Л. Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

26. Соловьева Е. Е. Оптимизация работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов: технологический аспект / Е. Е. Соловьева // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта: Материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием. — Владивосток: Дальрыбвтуз, 2022. — С. 146–153.

REFERENCES

1. Galin, Aleksandr V., and Evgeny A. Davydenko. “Containerization as the next stage in the development of transport systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.6 (2020): 996–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-996-1003.

2. Yanchenko, A.A., T.E. Malikova, and A. V. Kuzmin. “The algorithm for ship clearance at port according to the technology of preliminary informing customs authorities under the conditions of the free port of Vladivostok.” *Territorii operezhayushchego social'no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossijskoj Federacii i svobodnyj port Vladivostok: sbornik nauchnyh trudov X Regional'noj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 25-letiyu FTS Rossii*. Vladivostok: Vladivostokskij filial Rossijskoj tamozhennoj akademii, 2016. 257–262.

3. Malikova, T.E. “Organizatsiya tamozhennogo kontrolya na konteinernykh terminalakh v morskikh punktakh propuska.” *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vladivostok: DVO RAT, 2013. 81–83.

4. Valkova, S. “Change of the sea port storage’s role in modern logistic supply chain environment.” *Transport business of Russia* 3 (2018): 110–113.

5. Valkova, S.S. “Preconditions for creating new methods of calculation parameters of the generalized warehouse of the sea port.” *Kompleksnye issledovaniya v rybohozyajstvennoj otrasli: Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh*. Vladivostok: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij rybohozyajstvennyj universitet, 2018. 257–263.

6. Eglit, Ya. Ya., K. Ya. Eglite, Yu. A. Solomatina, and E. P. Mylnikova. “Analysis of logistic processes in port.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(101) (2021): 3–6.

7. Yanchenko, A.A., and T. E. Malikova. “A discrete-event model for operations in container terminals.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(85) (2017): 25–31.

8. Lee, Taek Young, and R. G. Korol'. “Simulation modeling and evaluation of processing capacity of Busan transport hub elements.” *Modern technologies. System analysis. Modeling* 3(75) (2022): 171–180. DOI: 10.26731/1813–9108.2022.3(75).171–180

9. Korobkova, M.N. “Estimation of the impact of port operations technology on the quality of seaport services.” *Ekonomika i predprinimatel'stvo* 2(139) (2022): 1227–1230. DOI: 10.34925/EIP.2022.139.2.245.

10. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Roman V. Kuznetsov. “Mathematical description of the sea ports throughput assessment.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.3 (2022): 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.

11. Antonova, E., and Ilya Vasilev. “Planning cargo operations on cargo management branch of container terminal.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(91) (2019): 3–8. DOI: 10.34046/aumsuomt91/1.

12. Kurniawan, Fajar, Siti Nurmaya Musa, and Noor Hasnah Moin. “Container Movement Evaluation Using System Dynamics Simulation.” *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/IEEM45057.2020.9309883.

13. Soloveva, E.E. “Research of approaches in the algorithms development for managing an automated system for organizing the search and seizure of containers.” *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnog transporta: problemy*

i puti razvitiya: Materialy Pyatoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchatskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. 70–74.

14. Kuznetsov, A., and E. Davydenko. “Simulation of ship handling operations at container terminal.” *Transport business of Russia* 2 (2022): 205–207. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_205.

15. Lersteau, Charly, Trung Thanh Nguyen, Tri Thanh Le, Ha Nam Nguyen, and Weiming Shen. “Solving the problem of stacking goods: mathematical model, heuristics and a case study in container stacking in ports.” *IEEE Access* 9 (2021): 25330–25343. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052945.

16. Filippova, A. I., T. E. Malikova, and A. Zh. Radochinskaya. “Chelovecheskii faktor kak odna iz osnovnykh prichin avariinosti Rossiiskogo torgovogo flota.” *Problemy transporta Dalnego Vostoka. Materialy odinnadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: FEBRAT2015. Dalnevostochnoe otделение Rossiiskoi Akademii transporta, 2015. 50–52.*

17. Gannesen, Vitalii V., and Ekaterina E. Soloveva. “The human factor as one of the main causes of accidents.” *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University* 61.3 (2022): 64–69.

18. Malikova, T. E. *Sklady i skladskaya logistika. M.: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu “Izdatel'stvo YuRAIT”, 2021.*

19. Malikova, T. E., and A. I. Filippova. “Razrabotka sistemy slezheniya za importnymi gruzopotokami, oformlyаемymi po tekhnologii predvaritel'nogo informirovaniya v morskoy punkte propuska.” *Marine Intellectual Technologies* 4–2(34) (2016): 32–36.

20. Filippova, A. I., E. B. Osokina, and A. J. Radochinskaya. “The development of a monitoring system the condition of perishable cargo for sea container traffic.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(85) (2017): 31–35.

21. Malikova, T. E., E. E. Solov'eva, and V. V. Mikhlanoshin. RU 2023106450/11(014007), IPC B65G 60/00, B65G 59/02. Sposob transportirovaniya i skladirovaniya konteynerov. Russian Federation, assignee.

22. Malikova, T. E., E. E. Soloveva, and A. Zh. Radochinskaia. “Deterministic finite state machine for search of containers in stack.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(105) (2022): 91–100.

23. Radochinskaia, A. Zh., and T. E. Malikova. “The model of a subsidiary container stack formation for customs purposes using finite-state machine description language.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(99) (2021): 59–66.

24. Radochinskaia, A. Zh., T. E. Malikova, and A. Yu Strelkov. “Provability of Dangerous Goods Segregation Algorithm Description Using Finite State-machine Description Language.” *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). IEEE, 2021. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470722.*

25. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. “Box selectivity in different container cargo-handling systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

26. Solovyova, Ekaterina E. “Optimization of operation of rear cargo fronts of sea container terminals: technological aspect.” *Aktual'nye problemy razvitiya sudohodstva i transporta: Materialy Nacional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Vladivostok: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij rybohozyajstvennyj universitet, 2022. 146–153.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соловьёва Екатерина Евгеньевна —
старший преподаватель
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, д. 52-Б
e-mail: pillers@mail.ru

Маликова Татьяна Егоровна —
доктор технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
Верхнепортовая, 50а
e-mail: Malikova@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Soloveva, Ekaterina E. —
Senior Lecturer
Far Eastern State Technical
Fisheries University
52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation
e-mail: pillers@mail.ru

Malikova, Tatiana E. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Maritime State University
named after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: Malikova@msun.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.

Received: April 10, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-437-454

ASSESSING THE POSSIBILITY OF CHANGING THE MONITORING FREQUENCY OF THE RESIDUAL THICKNESSES OF THE NAVIGATION LOCKS GATES ELEMENTS

N. M. Ksenofontov¹, V. N. Loshak²

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

² — Volgo-Balt Administration, St. Petersburg, Russian Federation

One of the main methods for monitoring the technical condition of the navigation locks gates is to determine the amount of corrosion wear of their elements using ultrasonic thickness measurement. This diagnostic operation is performed at least once every five years. In accordance with the methodology, the control requires the removal of the protective coating in the measurement area. At the same time, there is no possibility of a full restoration of the coating. The specified frequency of measurements is adopted based on the peculiarities of the maintenance of locks and the durability of protective coatings, the service life of which does not exceed 5 years. It is noted that recently, the cases of measurements with a satisfactory technical condition of the protective coating on the elements of the structures, which are being examined, have been more frequent. This circumstance indicates an increase in the service life of protective coatings and, consequently, the possibility of revising the established frequency of measurements of the residual thickness of the gates elements. In this regard, the purpose of the study is to assess the possibility of changing the timing of ultrasonic thickness measurement during primary and periodic measurements of the residual thicknesses of the gate elements, taking into account the state of the protective coating. To achieve this goal, the collection and analysis of the range of protective coatings used in the anticorrosion protection of the main and emergency repair gates of navigation locks, their service life, as well as permissible deviations in thickness for the supplied rolled metal, are carried out. It has been established that epoxy-based protective coatings are most often used as primer and top coats. The thickness of the applied coatings has increased by 2–3 times and averages 200–350 μm. Damage to coatings in the period from 5 to 10 years of operation averages about 6 % of the total surface area. In the course of the study, it has been also found that the permissible minus limit values for deviations in the thickness of the supplied rolled products can range from 0.8 to 4.2 mm, depending on the thickness of the sheet and the accuracy of its manufacture. The presence of such deviations has a particularly negative effect on the resource of small thicknesses. Additionally, the maximum average value of the corrosion rate of metal structure elements in operation is determined. The totality of the information obtained makes it possible to develop recommendations for changing the timing of the residual thicknesses measurement, ensuring the safe operation of the considered elements of mechanical equipment.

Keywords: navigation lock, gate, engineering status, protective coating, anti-corrosive protection, metal corrosion, ultrasonic thickness measurement, inspection period.

For citation:

Ksenofontov, Nikolay M., and Vitaliy N. Loshak. "Assessing the possibility of changing the monitoring frequency of the residual thicknesses of the navigation locks gates elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 437–454. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-437-454.

УДК 626.44; 626.45

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ ТОЛЩИН ЭЛЕМЕНТОВ ВОРОТ И ЗАТВОРОВ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ

Н. М. Ксенофонтов¹, В. Н. Лошак²

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

² — ФБУ «Администрация «Волго-Балт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является один из основных методов контроля технического состояния ворот и затворов судоходных шлюзов, такой как определение величины коррозионного износа их элементов

с помощью ультразвуковой толщинометрии. Данная диагностическая операция выполняется не реже одного раза в пять лет. В соответствии с методикой для проведения контроля требуется удаление защитного покрытия на участке измерений. При этом возможность полноценного восстановления покрытия отсутствует. Указанная периодичность измерений принята исходя из особенностей технического обслуживания шлюзов и стойкости защитных покрытий, срок службы которых не превышал 5 лет. Отмечается, что в последнее время участились случаи проведения измерений при удовлетворительном техническом состоянии защитного покрытия на элементах обследуемых конструкций. Данное обстоятельство свидетельствует об увеличении срока службы защитных покрытий и, следовательно, возможности пересмотра установленной периодичности измерений остаточной толщины элементов ворот и затворов. В связи с этим целью исследования является оценка возможности изменения сроков проведения ультразвуковой толщинометрии при первичных и периодических измерениях остаточных толщин элементов ворот и затворов с учетом состояния защитного покрытия. Для решения поставленной цели выполнен сбор и анализ номенклатуры защитных составов, применяемых при противокоррозионной защите основных и аварийно-ремонтных ворот шлюзов, сроках их службы, а также допустимых отклонений по толщине для поставляемого металлопроката. Установлено, что чаще всего в качестве грунтового и покрывного слоев используются защитные составы на эпоксидной основе. При этом толщина наносимых покрытий увеличилась в 2–3 раза и составляет в среднем 200–350 мкм. Повреждаемость покрытий в период от 5 до 10 лет эксплуатации в среднем составляет ~ 6 % от общей площади поверхности. В ходе исследования также установлено, что допустимые минусовые предельные значения отклонений толщины поставляемого проката могут составлять 0,8–4,2 мм в зависимости от толщины листа и точности его изготовления. Наличие подобных отклонений особенно негативно сказывается на ресурсе малых толщин. Дополнительно определено максимальное среднее значение скорости коррозии элементов металлоконструкций, находящихся в эксплуатации. Совокупность полученных сведений позволила разработать рекомендации по изменению сроков измерения остаточных толщин, обеспечивающих безопасную эксплуатацию рассматриваемых элементов механического оборудования.

Ключевые слова: судоходный шлюз, ворота, затвор, техническое состояние, защитное покрытие, противокоррозионная защита, коррозия металла, ультразвуковая толщинометрия, периодичность контроля.

Для цитирования:

Ксенофонтов Н. М. Оценка возможности изменения периодичности контроля остаточных толщин элементов ворот и затворов судоходных шлюзов / Н. М. Ксенофонтов, В. Н. Лошак // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 437–454. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-437-454.

Введение (Introduction)

Одной из основных диагностических операций при контроле технического состояния металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов на этапе эксплуатации является измерение остаточной толщины их элементов. Данная контрольная операция выполняется для оценки величины коррозионного повреждения (износа), а также определения динамики данного процесса. Результаты контроля используются как для определения текущего состояния контролируемой металлоконструкции, так и прогнозирования ее остаточного ресурса.

В качестве средства измерения повсеместно применяются эхо-импульсные ультразвуковые толщинометры с совмещенными и раздельно-совмещенными преобразователями, принцип действия которых основан на однократном отражении зондирующего импульса. Для обеспечения ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля необходима подготовка поверхности, в частности, удаление защитного покрытия (ЗП) на локальном контролируемом участке элемента. Количество и площадь таких участков отраслевыми нормативными документами не нормируются и определяются экспертным методом в зависимости от продолжительности и условий эксплуатации, а также технического состояния диагностируемой металлоконструкции на момент проведения обследования. При этом, как правило, отсутствует возможность полноценного восстановления ЗП на контролируемых участках после завершения работ по проведению измерений остаточной толщины.

В соответствии с отраслевыми нормами¹ в условиях нормальной эксплуатации данные контрольные операции выполняются один раз в 5 лет независимо от состояния проверяемой металлоконструкции. Однако в ряде случаев на момент проведения контроля нанесенное на металлокон-

¹ МУ 050.025–2001. Определение технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС : метод. указания. М.: ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. 86 с.

струкцию ЗП не имеет существенных повреждений, что свидетельствует об отсутствии или довольно низкой динамике коррозионного процесса. Следует также отметить, что, по имеющейся информации, срок службы современных применяемых защитных составов достигает десять лет и более, что в два раза выше ранее существующего. Данное обстоятельство ставит под сомнение необходимость обязательного проведения измерения остаточной толщины элементов эксплуатируемых металлоконструкций с установленной периодичностью.

Выполненный анализ технической литературы и научных публикаций показал, что данный аспект в рамках технического диагностирования ранее не рассматривался. Например, в работах [1]–[5] приведены основные сведения и результаты исследований о коррозии металла и способах противокоррозионной защиты, а в [6]–[11] исследования направлены на повышение точности измерения остаточных толщин, внедрение новых способов контроля, в том числе измерение толщины металла под защитным покрытием.

Целью данного исследования, с учетом стоимости работ по противокоррозионной защите (ПКЗ) металлоконструкций ворот и затворов судоводных шлюзов и сроков службы покрытий, является оценка возможности увеличения временного интервала между проверками остаточных толщин элементов для сохранения целостности ЗП и недопущения преждевременного развития коррозионного процесса при условии возможности обеспечения безопасной эксплуатации рассматриваемых элементов механического оборудования судоводных шлюзов.

Для достижения поставленной цели необходима реализация следующих задач:

1. Анализ применяемых защитных покрытий при противокоррозионной защите ворот и затворов судоводных шлюзов.
2. Анализ материалов, применяемых для изготовления основных элементов металлоконструкций ворот и затворов судоводных шлюзов.
3. Определение максимальной усредненной величины скорости коррозии элементов рассматриваемых металлоконструкций с учетом результатов выполненных наблюдений и исследований.
4. Разработка предложений по изменению периодичности измерений остаточной толщины металла элементов эксплуатируемых ворот и затворов судоводных шлюзов с помощью ультразвуковой толщинометрии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В отличие от многих металлических конструкций, эксплуатируемых в различных отраслях промышленности, элементы ворот и затворов судоводных шлюзов, а также некоторых других гидротехнических сооружений могут контактировать с коррозионной средой, прежде всего пресной водой, с двух сторон. При этом одна часть элементов конструкции может находиться постоянно под водой (подводная коррозия), другая — в зоне переменного уровня (периодически смачиваемая поверхность) или только в воздушной среде (атмосферная коррозия) — рис. 1 и 2. Указанная особенность эксплуатации рассматриваемых конструкций свидетельствует о возможности ускоренного коррозионного износа отдельных (локальных) участков конструкции или элементов и, соответственно, сокращении срока ее эксплуатации. Примеры коррозионных повреждений элементов ворот и затворов представлены на рис. 3 и 4 [12]–[14]. Приведенные снимки свидетельствуют о необходимости тщательной и своевременной противокоррозионной защиты данных элементов механического оборудования шлюзов.

Основные требования по выбору защитного покрытия, подготовке поверхности и его нанесению регламентированы сводом правил СП 28.13330.2017¹. Согласно приведенной в нем классификации, нанесение ЗП, в том числе на металлоконструкции судоводных шлюзов, является одной из мер их изоляции от агрессивного воздействия коррозионной среды (атмосфера, пресная вода) и относится к методу вторичной защиты. До утверждения указанного свода правил основным нормативным документом в области гидротехнического строительства в части противокоррозионной защиты являлся руководящий документ РД ГМ-01–02². В настоящее время для вновь проектируемых

¹ СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии: Утв. 2017-02-27. Введ. 2017-08-28.

² РД ГМ-01–02. Руководящий документ по защите от коррозии механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений: Утв. 2002-03-21.

и реконструируемых металлоконструкций судоходных гидротехнических сооружений данный документ может рассматриваться только в качестве рекомендательного.

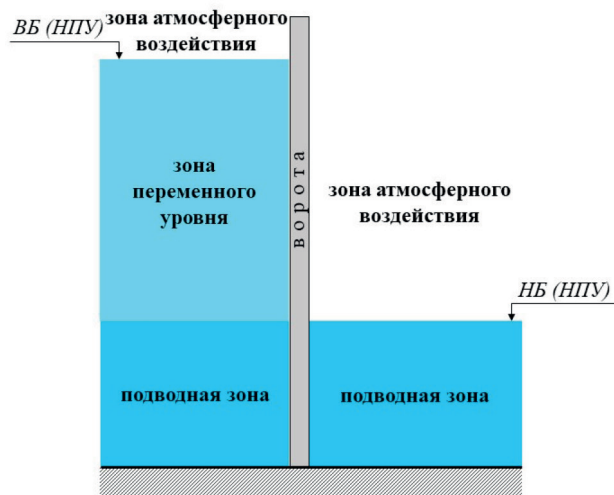


Рис. 1. Схема зонирования воздействия коррозионной среды на металлоконструкцию шлюзов на примере нижних основных двустворчатых ворот

а)



б)

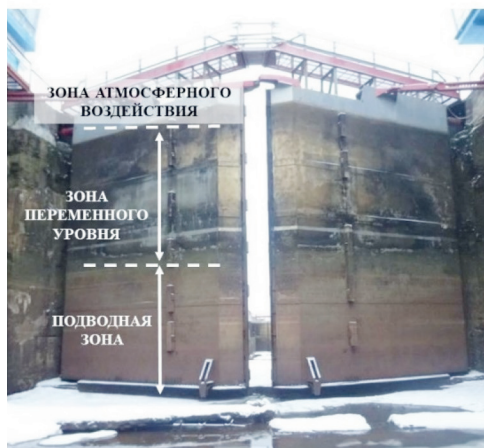


Рис. 2. Зонирование воздействия коррозионной среды на примере эксплуатируемых двустворчатых ворот с безнапорной (а) и напорной (б) сторон

а)



б)



Рис. 3. Примеры язвенной коррозии на элементах ворот (а) и затворах (б) судоходных шлюзов



Рис. 4. Сквозная коррозия
в силовом элементе затвора

Изначально при ПКЗ металлоконструкций ворот и затворов шлюзов в качестве ЗП применялись битумные материалы, представляющие собой растворы битумов, каменноугольного пека в органических растворах — ксилоле, сольвенте или уайт-спирите (Кузбасслак), лак БТ № 177, краска АЛ-177 и др.) [15], [16]. Срок службы таких покрытий был весьма непродолжителен и составлял один-два года в условиях эксплуатации металлоконструкций в атмосфере, три-четыре месяца при эксплуатации в погруженном состоянии и три-шесть месяцев в зоне переменного уровня (вода / атмосфера).

Отказ от битумных покрытий в 1960–70-е гг. и переход на модифицированные алкидные лакокрасочные материалы позволили увеличить срок между возобновлением защитного покрытия до 5–7 лет в зависимости от условий эксплуатации. Отличие зарубежной практики противокоррозионной защиты в указанный период времени заключается в нанесении в некоторых случаях разных видов покрытий на одну металлоконструкцию. Например, двустворчатые ворота, эксплуатируемые в 1950–70-х гг. на Морском пути Святого Лаврентия, были окрашены двумя составами: виниловым покрытием (на основе сополимера винилхлорида с винилацетатом) на открытых элементах, непосредственно контактирующих с коррозионной средой, и эпоксидно-каменноугольной эмалью на элементах, расположенных в воздушных, герметичных отсеках створок [17]. На рис. 5 показано состояние покрытия на данных металлоконструкциях после 40 лет эксплуатации.

а)



б)



Рис. 5. Примеры состояния защитного покрытия на элементах двустворчатых ворот на одном из шлюзов, расположенном на Морском пути Святого Лаврентия после 40 лет эксплуатации:
а — виниловое покрытие; б — эпоксидно-каменноугольная эмаль

Следует отметить, что толщина нанесенных покрытий на элементы указанных конструкций составляла 200–700 мкм, тогда как на воротах и затворах, эксплуатируемых на внутренних водных путях СССР и РФ (до недавнего времени), она находилась, как правило, в диапазоне 80–150 мкм.

С учетом наличия на рынке РФ широкой номенклатуры ЗП, декларируемый срок службы которых составляет 10 лет и более, представляется целесообразным выполнить анализ составов, применяемых в настоящее время при противокоррозионной защите металлоконструкций ворот и затворов СГТС. Решение данной задачи заключается в сборе информации от эксплуатирующих организаций о нанесенных покрытиях на металлоконструкции основных и аварийно-ремонтных ворот за последние несколько лет, а также выполнении анализа проектной документации в этой части на строящемся Багаевском гидроузле и реконструируемом Городецком гидроузле со строительством дополнительной шлюзовой камеры 15А. Кроме анализа номенклатуры применяемых типов защитных покрытий необходимо установить диапазоны толщин наносимых покрытий и их состояния в зависимости от их срока службы. Результаты данного анализа позволят определить возможность корректировки сроков периодического контроля остаточных толщин элементов.

Помимо агрессивности коррозионной среды, наличия и состояния ЗП динамика рассматриваемого деструктивного процесса также зависит от коррозионной стойкости применяемого основного материала — марки стали. В связи с этим требуется сбор и анализ сведений о марках сталей, используемых для изготовления металлоконструкций ворот и затворов. Указанная задача решается с помощью анализа проектной и технической документации, результатов наблюдений и исследований, деклараций безопасности, а также технической литературы и научных публикаций в данной области. На продолжительность эксплуатации ворот и затворов оказывает возможное влияние наличие отклонений построечной толщины их элементов от ее проектных значений.

Для металлоконструкций, устанавливаемых в 1960–80-е гг. характерным являлось наличие поставляемого проката, имеющего плюсовое отклонение по толщине, что, как следствие, несколько увеличивало ресурс металлоконструкций. Исходя из имеющихся данных первичных оценок технического состояния вновь изготовленных ворот и затворов следует, что намечается тенденция поставки металлопроката, имеющего минусовое отклонение по толщине. Указанное обстоятельство свидетельствует о необходимости оценки регламентированных допускаемых предельных минусовых отклонений толщины поставляемого проката, величина которых может быть установлена путем анализа требований нормативных документов.

При оценке технического состояния ворот и затворов срок их возможной безопасной эксплуатации по процессу коррозии устанавливается в соответствии с основными силовыми элементами, имеющими наименьший остаточный ресурс. Величина ресурса определяется с учетом зафиксированных (измеренных) фактических значений остаточных толщин и динамики коррозионного процесса.

При постепенном утонении элементов их расчетный допустимый остаточный срок службы определяется по формуле, приведенной в МУ 050.025–2001:

$$T_d = \frac{1}{K_8} \frac{P_{пдз} P_i}{v_n}, \quad (1)$$

где K_8 — коэффициент, учитывающий погрешность измерения контролируемого параметра и скорости его изменения во времени и выбираемый в зависимости от принадлежности металлоконструкции к одной из трех групп по степени последствий их вероятного отказа;

$P_{пдз}$ — предельно допустимое значение остаточной толщины элемента;

P_i — текущее значение остаточной толщины элемента, установленное при обследовании, а в случае первичной оценки технического состояния, его проектное значение;

v_n — скорость коррозии в течение рассматриваемого интервала времени.

В рамках решения поставленной научной задачи представляется целесообразным использование формулы (1) для аналитической оценки возможности изменения сроков проведения первичного контроля остаточных толщин. При решении данной задачи величина K_8 принималась в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Обобщенная характеристика регламентированного группирования ворот и затворов шлюзов в зависимости от последствий потенциального отказа

Группа	Последствия потенциального отказа	Наименование металлоконструкций	Значения K_{ϕ}	Сроки проведения оценки технического состояния		
				первичная	периодическая	экспертная *
А	Разрушение напорного фронта	Аварийные, аварийно-ремонтные и аварийно-эксплуатационные ворота, верхние ремонтные заграждения, основные эксплуатационные ворота при отсутствии аварийных ворот на верхней голове	1,50	После 5 лет эксплуатации	Не реже 1 раза в 5 лет	После 30 лет эксплуатации
Б	Длительное прекращение судоходства / возможность человеческих жертв	Основные эксплуатационные ворота (при наличии аварийных ворот на верхней голове), нижние ремонтные заграждения	1,35	После 5 лет эксплуатации	Не реже 1 раза в 5 лет	После 35 лет эксплуатации
В	Кратковременная задержка судоходства / увеличение времени шлюзования	Затворы водопроводных галерей	1,20	После 5 лет эксплуатации	Не реже 1 раза в 5 лет	После 40 лет эксплуатации

*Помимо указанных сроков экспертная оценка технического состояния ворот и затворов выполняется при превышении срока их эксплуатации, указанного в проектной документации (при его наличии), при достижении предельного состояния одного или нескольких силовых элементов, а также при значительном увеличении скорости деструктивных процессов.

В качестве допустимой остаточной толщины элемента принимается значение, равное установленной проектной толщине с учетом 15 % износа в соответствии с требованиями МУ 050.025–2001. Величина P_i принимается, в первом случае равной принятому проектному значению толщины, во втором — проектному значению толщины с учетом предельного минусового значения проката. Скорость коррозии определяется в соответствии с формулой

$$v_{\Pi} = \frac{|P_i - P_{i-1}|}{t}, \quad (2)$$

где P_{i-1} — значение остаточной толщины элемента, установленное в результате предыдущего обследования;

t — интервал времени между проверками, годы.

В качестве P_{i-1} в рамках настоящего исследования принимается минимальная средняя остаточная толщина наиболее изношенного силового элемента, значение которой установлено в ходе натурных наблюдений. За интервал времени принимается срок эксплуатации металлоконструкции на момент проведения обследования. В качестве источников информации использованы результаты наблюдений и исследований, представленные в научно-исследовательских работах, технических отчетах и протоколах по контролю и оценке технического состояния ворот и затворов шлюзов, в том числе работы [12]–[14], [18]–[20].

Результаты (Results)

В процессе анализа предоставленной от эксплуатирующих организаций информации было установлено, что в период 2011–2021 гг. противокоррозионная защита была выполнена на 163 металлоконструкциях основных и аварийно-ремонтных ворот. В подавляющем большинстве случаев в качестве грунтового и покрывного (пленкообразующего) слоев применялись эпоксидные составы, реже — полиуретановые (рис. 6). Другие типы покрытий были использованы в единичных случаях.

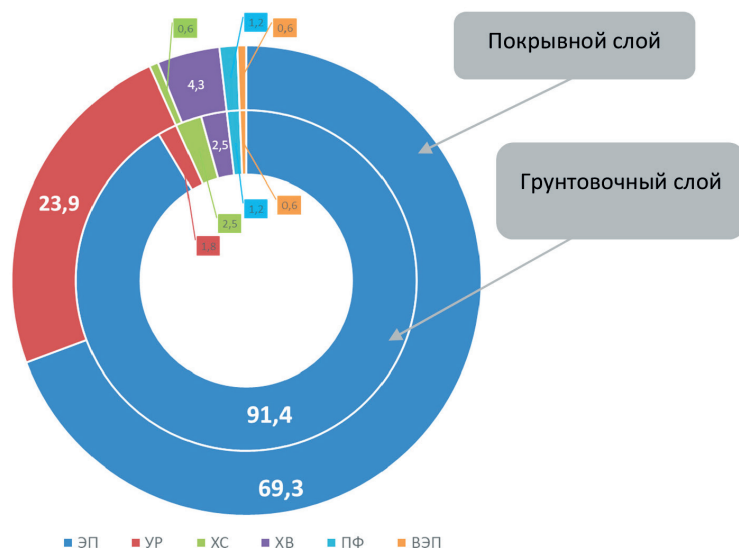


Рис. 6. Процентное соотношение типов защитных покрытий, использованных при противокоррозионной защите металлоконструкций основных и аварийно-ремонтных ворот в 2011–2021 гг.

Условные обозначения:

ЭП — эпоксидное; УР — полиуретановое;
ХС — сополимерно-винилхлоридное; ПХВ — перхлорвиниловое,
АПФ — алкидное пентафталеовое; ВЭП — винилово-эпоксидное

Декларируемая толщина нанесенных ЗП за рассматриваемый период времени неодинакова и варьируется от 80 до 400 мкм (в среднем 200–350 мкм) — рис. 7. В большинстве случаев толщина нанесенных

покрытий больше рекомендованных значений, приведенных в методических указаниях МУ 050.025–2001 (120 мкм для металлоконструкций, работающих в пресной воде, и 80 мкм для конструкций, эксплуатируемых в открытой атмосфере). При этом на некоторых металлоконструкциях она ниже значений, установленных сводом правил СП 28.13330.2017 — 220 мкм для среднеагрессивной и 300–500 мкм для сильноагрессивной коррозионных сред. Следует отметить, что степень агрессивности среды (воды), в соответствии с данным сводом правил, должна определяться путем измерения уровня водородного показателя pH и суммарной концентрации сульфатов и хлоридов в воде. Однако при выполнении анализа проектной документации на реконструкцию и капитальный ремонт ворот и затворов СГТС наличие сведений о результатах проведения требуемого химического анализа не установлено.

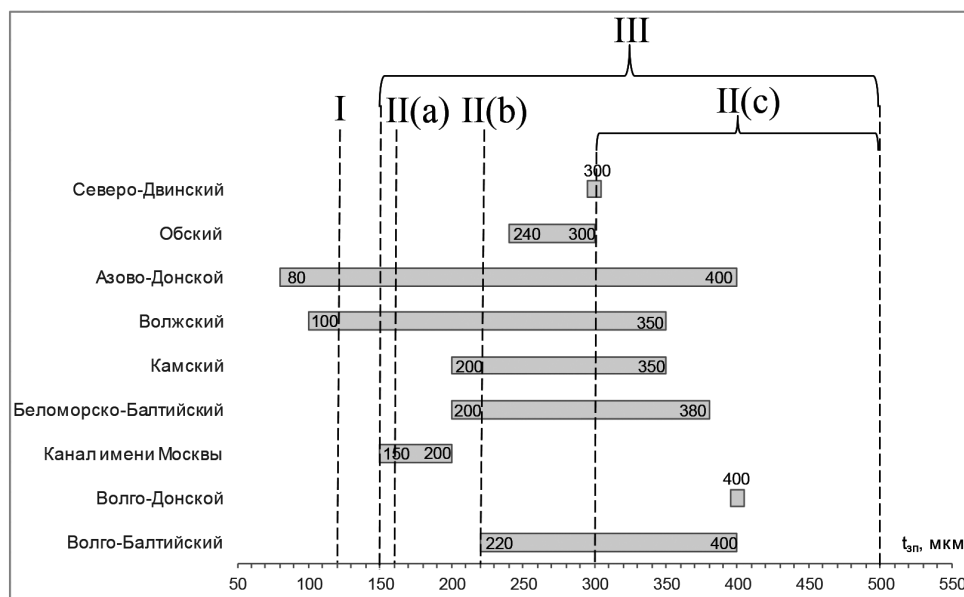


Рис. 7. Сведения о проектных значениях толщины защитных покрытий, применяемых при ПКЗ ворот и затворов шлюзов
Администраций бассейнов внутренних водных путей и ФГБУ «Канал имени Москвы»
Условные обозначения:

- I* — требуемая толщина ЗП в соответствии с МУ 050.025–2001;
II — требуемая толщина ЗП в соответствии с СП 28.13330.2017
(*a* — слабоагрессивная среда, *b* — среднеагрессивная среда, *c* — сильноагрессивная среда);
III — требуемая толщина ЗП в соответствии с РД ГМ-01–02

Следует отметить, что в ходе анализа выполненных инструментальных обследований эксплуатируемых в течение длительного времени металлоконструкций фактическая толщина ЗП составляет в среднем 75–200 мкм [12]–[14], [18]–[20] и может изменяться в широком диапазоне значений на одном контролируемом участке.

В процессе анализа проектной документации установлено, что в качестве защитного покрытия металлоконструкций проектируемой дополнительной шлюзовой камеры № 15А Городецкого гидроузла¹ предлагается применять двухкомпонентную тиксотропную эпоксидную грунт-эмаль. Толщина покрытия должна быть ≥ 300 мкм. Для металлоконструкций строящегося Багаевского гидроузла² тип применяемого покрытия и его требуемая толщина не указаны. Данный вопрос будет решаться на стадии разработки рабочей документации.

¹ Реконструкция судоходных шлюзов 15, 16 Городецкого гидроузла, включая строительство дополнительной камеры шлюза и создание судоходного канала от г. Городец до г. Н. Новгород. 2-й этап — проект. док. Разд. 4: Конструктивные и объемно-планировочные решения. Кн. 4.1: Реконструкция шлюзов № 15–16. Механическое оборудование дополнительной камеры шлюза № 15а. Механическое оборудование 2993-ПИР-П-2-КР2.4.1. Т. 4.2.4.1. СПб: АО «Ленгипроречтранс», 2022.

² «Строительство Багаевского гидроузла на р. Дон». Объекты 2-го этапа (осн. периода). Проект. док. Разд. 4: Конструктивные и объемно-планировочные решения. Судоходный шлюз. Рабочие двусторчатые ворота. 03-16-ОК-2-КР-СШ-МО.2. Т. 4.5.2. М.: АО «Акватик», 2018.

В дополнение к ранее изложенному следует отметить, что срок службы покрытий также неодинаков и может варьироваться в зависимости от соблюдения требований при проведении ПКЗ и условий эксплуатации металлоконструкций. Согласно сведениям, представленным в РД ГМ-01-02, он декларативно находится для рассматриваемых условий эксплуатации в диапазоне от 5 до 25 лет. В ходе анализа полученных данных о степени повреждений ЗП было установлено, что, как правило, в первые пять лет эксплуатации средняя величина повреждений покрытий в виде отслаивания, шелушения, вздутия и других видов повреждения не превышает 1 % от площади конструкции, но в отдельных случаях значение данного показателя составляет 10–50 %. По всей видимости, данное обстоятельство, прежде всего, обусловлено не столько типом применяемого покрытия и условиями эксплуатации металлоконструкций, сколько соблюдением технологии подготовки поверхности и его нанесения. Степень повреждения покрытий при его продолжительности эксплуатации 5–10 лет в среднем составляет ~ 6 %. Максимальное значение данного показателя составляет 40–50 %.

В качестве основного материала для вновь изготавливаемых металлоконструкций ворот и затворов применяется сталь 09Г2С, которая также активно используется в судостроительной отрасли. До активного внедрения данной марки стали при изготовлении шлюзовых металлоконструкций использовались стали Ст. 3сп и М16С. Также известны единичные случаи изготовления металлоконструкций из сталей Ст. 20 и 10ХСНД. На данный момент более 50 % эксплуатируемых ворот и затворов судоходных шлюзов изготовлены из стали 09Г2С.

В различных источниках, в том числе в исследовании [21], утверждается, что скорость коррозии низколегированных и углеродистых сталей примерно одинакова. Согласно исследованиям [22]–[25], средняя скорость коррозии стали 09Г2С в средне- и сильноагрессивных коррозионных средах составляет 0,2–1,5 мм/год в зависимости от степени воздействия различных факторов при условии отсутствия ЗП. Для стали Ст. 3сп значение данного показателя составляет 0,02–0,4 мм/год. В приведенных исследованиях отмечается также склонность стали 09Г2С к образованию коррозионных язв. Табл. 2 содержит данные о фактической скорости коррозионного процесса на основных силовых элементах ворот и затворов судоходных шлюзов, полученных в ходе натурных наблюдений и исследований.

Исходя из анализа полученных данных, средняя максимальная скорость коррозии элементов ворот и затворов шлюзов примерно одинакова и составляет: для стали 09Г2С 0,07 мм/год, сталей Ст. 3 и М16С — 0,06 мм/год. Приведенные расчетные значения скорости коррозии не превышают допускаемое значение данного параметра 0,1 мм, указанного в МУ 050.025–2001. При этом скорость местной, в том числе язвенной коррозии, в ряде случаев значительно превышает допускаемое значение, равное 0,2 мм, приведенное в том же документе. Отличие значений динамики коррозионного процесса, полученных в ходе лабораторных исследований, от результатов натурных измерений объясняется возобновлением ЗП на эксплуатируемых конструкциях.

Таблица 2

**Сведения о скорости коррозионного процесса
на основных силовых элементах ворот и затворов судоходных шлюзов**

Наименование сооружения	Наименование металлоконструкции	Длительность эксплуатации на момент обследования, годы	Материал основных элементов	Средняя максимальная скорость коррозии, мм/год
Нижне-Камский шлюз	БОВ (ПОВ)	37	М16С	0,06
	АРВ (ПОВ)	37	М16С	0,04
	НОВ (ДВ)	37	М16С	0,06
	Основные затворы опорожнения	40	М16С	0,16
	Верховые ремонтные затворы опорожнения	40	М16С	0,04
	низовые ремонтные затворы опорожнения	40	М16С	0,05

Окончание табл. 2

Шлюзы № 1–9, 11–18 ББК	ВОВ (ДВ)	62–64	Сталь 3	0,04
Шлюз № 1 ББК	НОВ (ДВ)	62	Сталь 3	0,03
Шлюзы № 1, 3, 13 ББК	ОВСГ (ДВ)	61–62	Сталь 3	0,04
Шлюз № 16 ББК	ОВСГ (ДВ)	35	09Г2С	0,04
Шлюз № 8 ББК	АРВ (секторные)	31	М16С	0,07
Шлюз № 14 ББК	АРВ (секторные)	33	М16С	0,11
Павловский шлюз	НОВ (ПОВ)	37	09Г2С	0,08
	Рабочий затвор наполнения	36	Сталь 3	0,03
Нижне-Свирский шлюз	ВОВ (ДВ)	49	М16С	0,04
	НОВ (ДВ)	42	М16С	0,02
	Верховые ремонтные затворы наполнения	87	М16С	0,08
	низовые ремонтные затворы наполнения	87	М16С	0,7
Верхне-Свирский шлюз	НОВ (ДВ)	37	09Г2С	0,07
Самарский шлюз	Основной затвор входного оголовка холостого водосброса	64	Сталь 3	0,05
	ремонтный затвор входного оголовка холостого водосброса	64	Сталь 3	0,19
Шлюзы № 1–6 ВБВП	ВОВ (ПОВ)	59–60	М16С	0,03
	НОВ (ДВ)	8–13	09Г2С	0,07
Шлюз № 30 Волгоградского г/у	ВОВ (ДВ)	57	М16С	0,03
	НОВ (ДВ)	57	М16С	0,04
Новосибирский шлюз	ВОВ (ПОВ)	10	09Г2С	0,08

Примечания: 1. Скорость коррозии рассчитывалась по наиболее поврежденному силовому элементу. 2. ВОВ — верхние основные ворота. 3. АРВ — аварийно-ремонтные ворота. 4. НОВ — нижние основные ворота. 5. ПОВ — подъемно-опускные ворота. 6. ДВ — двустворчатые ворота. 7. ОВСГ — основные ворота средней головы. 8. ББК — Беломорско-Балтийский канал. 9. ВБВП — Волго-Балтийский водный путь.

В ходе анализа допускаемых предельных минусовых значений отклонений толщины проката, регламентированных ГОСТ 19903–2015¹, установлено, что данная величина варьируется от 0,8 до 4,2 мм в зависимости от толщины листа и точности изготовления. Доказательство влияния наличия предельно-допускаемых минусовых отклонений проката на ресурс элементов ворот и затворов приведено на рис. 8, откуда следует, что отклонение проката крайне негативно влияет на ресурс изделий с малой толщиной. Например, для элемента, толщина которого равна 10 мм, отклонение поставляемого проката в меньшую сторону может достигать 8 %, что составляет больше половины от допускаемого значения коррозионного износа, равного 15 %, и вдвое снижает его остаточный ресурс. Следует отметить, что по сравнению с редакцией указанного стандарта от 1974 г. в действующей версии несколько снижена величина плюсовых предельных отклонений толщины проката.

Ввиду того, что минимальная толщина силовых элементов рассматриваемых металлоконструкций, как правило, составляет 10 мм, примем данное значение как лимитирующее. С учетом принятого допущения, на рис. 9 приведены сведения о минимальном ресурсе ворот и затворов шлюзов по процессу коррозии в зависимости от категории контролируемой металлоконструкции при условии неизменности полученной средней скорости коррозионного повреждения.

¹ ГОСТ 19903–2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2016.

а)



б)

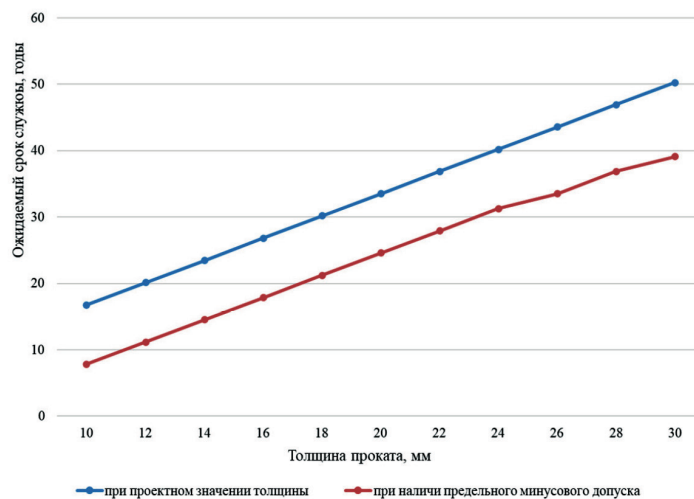


Рис. 8. Влияние наличия отклонения толщины поставляемого проката на ресурс (а) и минусового отклонения толщины поставляемого металлопроката на срок службы элементов ворот и затворов (б)

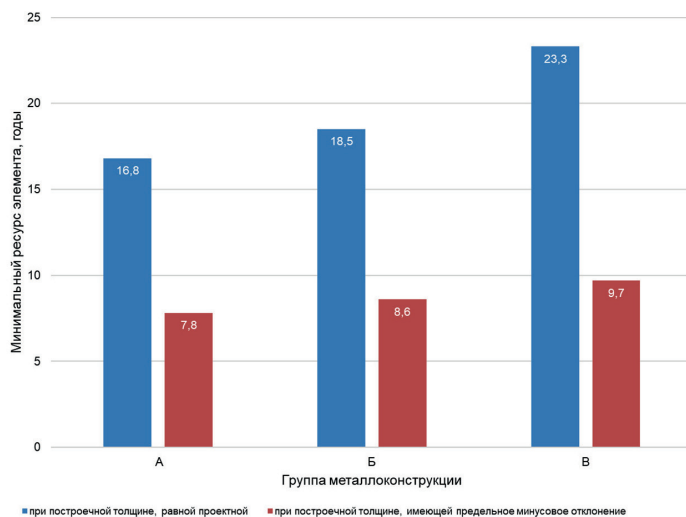


Рис. 9. Минимальный ресурс элементов ворот и затворов судовых шлюзов по процессу коррозионного изнашивания

В результате минимальный ресурс металлоизделий составляет при проектной толщине проката, равной 10 мм, 17–23 года в зависимости от принадлежности к одной из описанных ранее групп металлоконструкций, а при наличии предельных минусовых отклонений — 8–10 лет.

Обсуждение (Discussion)

Полученные в ходе настоящего исследования результаты в целом свидетельствуют об увеличении средней продолжительности срока службы ЗП, что связано с применением современных защитных составов, увеличением толщины покрытия, повышением качества работ по противокоррозионной защите, а также снижением степени агрессивности коррозионной среды из-за уменьшения поступления в реки и каналы промышленных стоков. Однако следует учесть, что приведенные в настоящей работе результаты оценки состояния защитного покрытия элементов обследуемой металлоконструкции, в частности площадь его повреждения, являются достаточно субъективными, так как оцениваются только визуально и, соответственно, напрямую зависят от квалификации специалистов, выполнявших осмотр. Также на ряде сооружений практикуется локальное восстановление покрытия на поврежденных участках собственными силами в рамках текущего ремонта. С учетом ранее изложенного, приведенные в настоящей работе данные по степени повреждения ЗП, полученные от эксплуатирующих организаций, можно рассматривать только как приблизительные.

Согласно полученным данным о средней максимальной скорости коррозии, минимальный срок безопасной эксплуатации металлоконструкций ворот и затворов варьирует от 8 до 25 лет. Следует отметить, что скорость коррозионного повреждения в настоящем исследовании для упрощения принята как стабильная величина на всем сроке службы металлоконструкции. В реальных условиях она, как правило, является монотонно-возрастающей величиной (рис. 10) [6]. Тем не менее с учетом имеющихся неопределенностей в виде агрессивности среды, длительности контакта металла с агрессивной средой, качества и стойкости нанесенных покрытий, а также ряда других факторов первичное измерение остаточных толщин целесообразно проводить не позднее, чем через 10 лет для групп А и Б и 15 лет для группы В с момента ввода в эксплуатацию. При этом, в случае наличия только локального повреждения ЗП (до 15–20 % от площади конструкции), можно ограничиться проведением контроля только на этих участках.

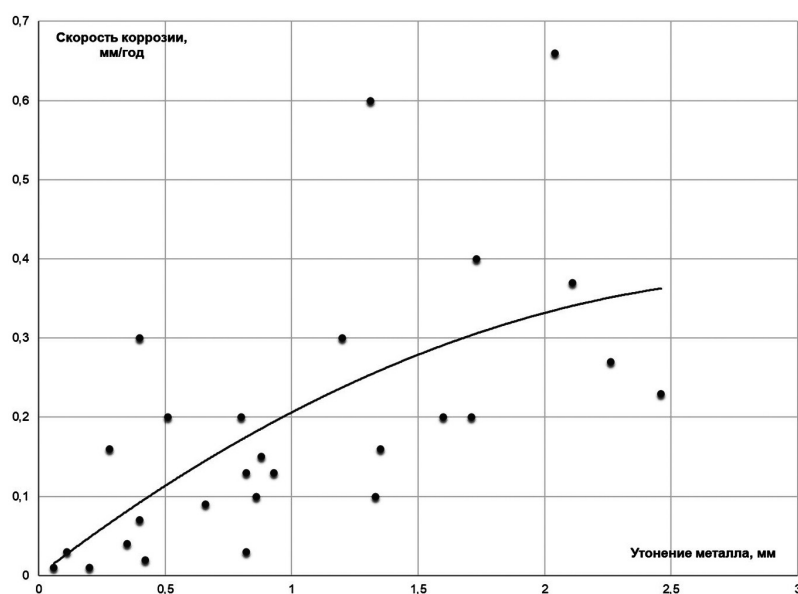


Рис. 10. Зависимость скорости развития коррозии от степени повреждения поверхности элементов ворот и затворов шлюзов

Необходимо отметить, что для металлоконструкций затворов, эксплуатируемых на объектах гидроэнергетики, срок проведения первичных измерений остаточной толщины с помощью

ультразвуковой толщинометрии составляет 25 лет с момента ввода конструкции в эксплуатацию¹. Представляется, что указанный срок является не совсем корректным и не учитывает степень ответственности контролируемых конструкций и особенностей их эксплуатации.

Выполнение последующих периодических измерений остаточной толщины рекомендуется выполнять один раз в 5 лет в соответствии с требованиями МУ 050.025–2001. При этом указанный срок может быть увеличен в зависимости от состояния защитного покрытия. Однако в этом случае периодичность контроля не должна превышать:

- один раз в 7 лет — решение принимается эксплуатирующей организацией;
- один раз в 10 лет — решение принимается эксплуатирующей организацией с привлечением научной и / или проектной организации.

Указанная возможность определяется с учетом следующих факторов:

- состояние защитного покрытия (решение принимается на основании визуального и измерительного контроля, оформленного в виде акта или протокола с фотофиксацией состояния покрытия на элементах металлоконструкции);
- степень коррозионного повреждения основного металла (результаты текущего и предшествующих визуальных осмотров);
- анализ информации о скорости коррозионного процесса, установленного при предыдущих измерениях.

Решение о переносе срока измерения остаточной толщины должно быть оформлено в виде распоряжения / приказа, содержащего в качестве приложения копии протокола визуального осмотра металлоконструкции, протокола оценки состояния защитного покрытия, а также заключения научной и / или проектной организации (при их привлечении). Также данный вид контроля в полном объеме целесообразно выполнять непосредственно перед восстановлением защитного покрытия элементов.

При проведении экспертной оценки технического состояния металлоконструкций ворот и затворов, в соответствии с требованиями методических указаний, решение о необходимости измерения остаточных толщин, сопровождающееся локальным удалением ЗП (зачистка точек контроля), принимается руководителем работ (экспертной комиссией) организации-исполнителя по согласованию с эксплуатирующей организацией.

Помимо приведенных рекомендаций представляется необходимым проведение входного контроля вновь изготовленных металлоконструкций для определения фактических толщин их элементов с целью определения наличия отклонений металла от проектных значений. Предлагаемые изменения по периодичности контроля остаточной толщины металла позволят повысить целенаправленность диагностических операций, предотвратить преждевременное разрушение защитного покрытия элементов металлоконструкций ворот и затворов, не снижая при этом уровня безопасности сооружений, на которых они установлены.

Заключение (Conclusion)

Полученные результаты в ходе выполнения настоящего исследования свидетельствуют о возможности обоснованного смещения (в сторону увеличения) сроков первичных измерений остаточной толщины элементов металлоконструкций ворот и затворов судоводных шлюзов, а также увеличения интервалов между измерениями, выполняемыми в рамках периодической оценки технического состояния. Данные результаты базируются на состоянии защитного покрытия диагностируемой конструкции, скорости коррозионного процесса, а также на возможном наличии отклонений от проектных значений. Выполнение приведенных рекомендаций позволит сохранить целостность защитного покрытия, не снижая при этом уровень безопасности рассматриваемых элементов механического оборудования.

¹ СТО 17330282.27.140.017–2008. Механическое оборудование гидротехнических сооружений ГЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Введ. 2008-07-30.

Помимо предложений по изменению сроков и периодичности измерения остаточных толщин, изложенных в настоящей работе, представляется целесообразным рассмотреть вопрос использования методов и средств измерений для контроля толщины элементов эксплуатируемых металлоконструкций ворот и затворов через защитное покрытие.

Анализ отраслевых нормативных документов в области оценки технического состояния металлоконструкций ворот и затворов шлюзов свидетельствует также о необходимости разработки методики контроля остаточных толщин их элементов, в том числе с учетом результатов настоящего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коррозия. Справочник / Под ред. Л. Л. Шпраера / Пер. В. С. Синявского. — М.: Металлургия, 1981. — 632 с.
2. Вернигорова В. Н. Коррозия строительных материалов: монография / В. Н. Вернигорова [и др.]. — М.: Издательство «Палеотип», 2007. — 176 с.
3. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справ. в 2 т. / Под ред. А. А. Герасименко. — М: Машиностроение, 1987. — Т. 2. — 784 с.
4. Калиновская В. А. Коррозия металлов. Методы по защите металлов от корродирования / В. А. Калиновская, Д. Д. Огурцова // Наука. Техника. Технологии (Политехнический Вестник). — 2022. — № 1. — С. 124–128.
5. Zhang Z. Life evaluation of organic coatings on hydraulic metal structures / Z. Zhang, J. Wu, X. Zhao, Y. Zhang, Y. Wu, T. Su, H. Deng // Progress in Organic Coatings. — 2020 — Vol. 148. — Pp. 105848. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105848.
6. Кузьмицкий М. Л. Коррозионный износ металлоконструкций ворот и затворов судоходных гидротехнических сооружений и оценка их остаточного ресурса / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов // Гидротехническое строительство. — 2016. — № 2. — С. 42–45.
7. Дымкин Г. Я. Еще раз о влиянии шероховатости поверхности изделия на результаты УЗК прямыми ПЭП / Г. Я. Дымкин, В. П. Лохов // В мире неразрушающего контроля. — 2007. — № 1 (35). — С. 25–26.
8. Кузьмин Д. А. Влияние отложений на характер коррозионных процессов и ультразвуковой контроль толщин стенок трубопроводов / Д. А. Кузьмин, В. И. Бараненко // Тяжелое машиностроение. — 2020. — № 4. — С. 20–24.
9. Кузьмицкий М. Л. О достоверности результатов измерений ультразвуковым методом остаточной толщины металла элементов ворот и затворов судоходных шлюзов, находящихся в эксплуатации / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов // В мире неразрушающего контроля. — 2020. — Т. 23. — № 1. — С. 40–44. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-38-42.
10. Булатов А. С. Современные ультразвуковые методы измерения остаточной толщины стенок металлических изделий под защитными покрытиями / А. С. Булатов, В. А. Сясько // В мире неразрушающего контроля. — 2016. — Т. 19. — № 3. — С. 4–8.
11. Gan F. Ultrasonic thickness measurement technique with self-calibration function / F. Gan, L. Min, X. Tao, J. Liao // Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. — 2018. — Vol. 60. — Is. 11. — Pp. 619–625. DOI: 10.1784/insi.2018.60.11.619.
12. Ксенофонтов Н. М. Проведение экспертной оценки технического состояния основных ворот нижней головы Верхне-Свирского шлюза: тех. отчет / Н. М. Ксенофонтов. — СПб: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2022. — 126 с.
13. Ксенофонтов Н. М. Проведение экспертной оценки технического состояния верховых ремонтных затворов наполнения и опорожнения водопроводных галерей Нижне-Свирского шлюза по МУ 050.025–2001: тех. отчет / Н. М. Ксенофонтов. — СПб: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2020. — 87 с.
14. Ксенофонтов Н. М. Инструментальное обследование и выполнение поверочных расчетов фактической несущей способности металлоконструкций аварийно-ремонтного затвора, и выполнение поверочных расчетов фактической несущей способности обоих основных затворов на входном оголовке холостого водосброса шлюза № 23 Самарского РГСЧС — по результатам инструментального обследования металлоконструкций обоих основных затворов выполненных Заказчиком: тех. отчет / Н. М. Ксенофонтов. — СПб: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2020. — 86 с.

15. Садовский Г. Л. Ремонт судовых гидротехнических сооружений / Г. Л. Садовский. — М.: Транспорт, 1973. — 200 с.
16. Ярустовский А. А. Эксплуатация и ремонт затворов и механизмов / А. А. Ярустовский // Эксплуатация гидротехнических сооружений: сб. тр. первой конференции по эксплуатации судовых гидротехнических сооружений. — М: Речной транспорт, 1955. — С. 83–110.
17. Huntley R. A corrosion control plan for Saint Lawrence Seaway navigation locks / R. Huntley, D. Boich // Journal of protective coatings & linings. — 2019. — Vol. 36. — Is. 11. — Pp. 28–32.
18. Бод К. Ю. Проведение исследований и расчетный анализ фактической несущей способности металлоконструкции основных двустворчатых ворот нижней головы шлюза № 1 средних голов шлюзов №№ 1, 3, 13, 16, аварийно-ремонтных ворот шлюза № 14, затворов водоспуска № 141 Хижозерского гидроузла ФБУ «Администрация «Беломорканал» (Этап II): отчет о НИР / К. Ю. Бод. — Волгоград: АО «НИИЭС» Волгоградский филиал, 2018. — 189 с.
19. Бод К. Ю. Обследование металлоконструкций основных двустворчатых ворот верхних голов судовых гидротехнических сооружений: тех. отчет / К. Ю. Бод. — Волгоград: АО «НИИЭС» Волгоградский филиал, 2019. — 521 с.
20. Бод К. Ю. Проведение обследования рабочих двустворчатых ворот нижней и верхней голов шлюза № 30 Волгоградского гидроузла ФБУ «Администрация «Волго-Дон» с выдачей заключения о техническом состоянии и расчетом ресурса дальнейшей эксплуатации: тех. отчет / К. Ю. Бод. — Волгоград: АО «НИИЭС» Волгоградский филиал, 2016. — 160 с.
21. Маркович Р. А. Коррозия морских гидротехнических сооружений / Р. А. Маркович, А. В. Колгушкин // Гидротехника. — 2009. — № 2. — С. 72–75.
22. Кученев В. О. Сводная оценка коррозионной стойкости отдельных марок стали нефтегазопроводных труб для РУП «Производственное объединение «Беларусьнефть» / В. О. Кученев, А. Г. Ракутько, А. С. Асадчев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. — 2020. — № 1 (80). — С. 94–101.
23. Коломийцев Е. В. Коррозионная стойкость сварных соединений судокорпусных материалов / Е. В. Коломийцев // Автоматическая сварка. — 2013. — № 4 (720). — С. 59–64.
24. Латыпова Д. Р. Исследование коррозии контактной пары сталей 09Г2С/12Х18Н10Т в технологических средах колонного оборудования / Д. Р. Латыпова [и др.] // Нефтегазовое дело. — 2020. — Т. 18. — № 6. — С. 122–129. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-122-129.
25. Коррозия и защита химической аппаратуры. Справочное руководство / коллектив авторов под ред. А. М. Сухотина. — М.: Химия, 1970. — Т. 3: Коррозия под действием теплоносителей и хладагентов. — 308 с.

REFERENCES

1. Shraer, L. L. *Korroziya. Spravochnik*. M.: Metallurgiya, 1981.
2. Vernigorova, V. N., E. V. Korolev, A. I. Eremkin, and Yu. A. Sokolova. *Korroziya stroitel'nykh materialov: Monografiya*. M.: Izdatel'stvo «Paleotip», 2007.
3. Gerasimenko, A. A., ed. *Zashchita ot korrozii, stareniya i biopovrezhdenii mashin, oborudovaniya i sooruzhenii*. Vol. 2. M: Mashinostroenie, 1987.
4. Kalinovskaya, Valeria Alexandrovna, and Darya Dmitrievna Ogurtsova. “Corrosion of metals. Methods for protecting metals from corrosion.” *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)* 1 (2022): 124–128.
5. Zhang, Zehui, Jin Wu, Xing Zhao, Yongsheng Zhang, Yaming Wu, Tian Su, and Huachao Deng. “Life evaluation of organic coatings on hydraulic metal structures.” *Progress in Organic Coatings* 148 (2020): 105848. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105848.
6. Kuz'mitskii, M. L., and N. M. Ksenofontov. “Corrosive wear of gate and valve metal structures at navigation locks and assessment of their remaining lifetime.” *Power Technology and Engineering* 50.2 (2016): 164–167. DOI: 10.1007/s10749-016-0677-8.
7. Dymkin, G. Ya., and V. P. Lokhov. “Eshche raz o vliyaniy sherokhatosti poverkhnosti izdeliya na rezul'taty UZK pryamymi PEP.” *V mire nerazrushayushchego kontrolya* 1 (2007): 25–26.
8. Kuzmin, D. A., and V. I. Baranenko. “Influence of deposits on the nature of corrosion processes and ultrasonic control of pipeline wall thickness.” *Tyazheloye Mashinostroyeniye* 4 (2020): 20–24.

9. Kuzmitskiy, M. L., and N. M. Ksenofontov. "On the reliability of the results of measurements of the residual thickness of the metal elements gates and valve of navigation locks in operation by the ultrasonic method." *NDT World* 23.1 (2020): 40–44. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-38-42.
10. Bulatov, A. S., and V. A. Syasko. "Modern ultrasonic methods to measure the remaining thickness of the wall of metal products under the protective coatings." *NDT World* 19.3 (2016): 4–8.
11. Gan, Fangji, Lin Min, Xu Tao, and Junbi Liao. "Ultrasonic thickness measurement technique with self-calibration function." *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 60.11 (2018): 619–625. DOI: 10.1784/insi.2018.60.11.619.
12. Ksenofontov, N. M. *Provedenie ekspertnoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnykh vorot nizhnei golovy Verkhne-Svirskogo shlyuza: Tekhnicheskii otchet*. SPb: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2022.
13. Ksenofontov, N. M. *Provedenie ekspertnoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya verkhovykh remontnykh zatvorov napolneniya i oporozhneniya vodoprovodnykh galerei Nizhne-Svirskogo shlyuza po MU 050.025–2001: Tekhnicheskii otchet*. SPb: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2020.
14. Ksenofontov, N. M. *Instrumental'noe obsledovanie i vypolnenie poverochnykh raschetov fakticheskoi nesushchei sposobnosti metallokonstruktsii avariino-remontnogo zatvora, i vypolnenie poverochnykh raschetov fakticheskoi nesushchei sposobnosti oboikh osnovnykh zatvorov na vkhodnom ogolovke kholostogo vodobrosa shlyuza № 23 Samarskogo RGSiS — po rezul'tatam instrumental'nogo obsledovaniya metallokonstruktsii oboikh osnovnykh zatvorov vypolnennykh Zakazchikom: Tekhnicheskii otchet*. SPb: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2020.
15. Sadovskii, G. L. *Remont sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. M.: Transport, 1973.
16. Yarustovskii, A. A. "Ekspluatatsiya i remont zatvorov i mekhanizmov." *Ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii: sb. tr. pervoi konferentsii po ekspluatatsii sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. M: Rechnoi transport, 1955. 83–110.
17. Huntley, Rick, and Dan Boich. "A corrosion control plan for saint lawrence seaway navigation locks." *Journal of Protective Coatings & Linings* 36.11 (2019): 28–32.
18. Bod, K. Yu. *Provedenie issledovaniy i raschetnyi analiz fakticheskoi nesushchei sposobnosti metallokonstruktsii osnovnykh dvustvorchatykh vorot nizhnei golovy shlyuza № 1 srednikh golov shlyuzov №№ 1, 3, 13, 16, avariino-remontnykh vorot shlyuza № 14, zatvorov vodospuska № 141 Khizhoverskogo gidrouzla FBU «Administratsiya «Belomorkanal» (Etap II): Otchet o NIR*. Volgograd: AO «NIIES» Volgogradskii filial, 2018.
19. Bod, K. Yu. *Obsledovanie metallokonstruktsii osnovnykh dvustvorchatykh vorot verkhnikh golov sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii: Tekhnicheskii otchet*. Volgograd: AO «NIIES» Volgogradskii filial, 2019.
20. Bod, K. Yu. *Provedenie obsledovaniya rabochikh dvustvorchatykh vorot nizhnei i verkhnei golov shlyuza № 30 Volgogradskogo gidrouzla FBU «Administratsiya «Volgo–Don» s vydachei zaklyucheniya o tekhnicheskoi sostoyanii i raschetom resursa dal'neishei ekspluatatsii: Tekhnicheskii otchet*. Volgograd: AO «NIIES» Volgogradskii filial, 2016.
21. Markovich, R. A., and A. V. Kolgushkin. "Korroziya morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii." *Gidrotekhnika* 2 (2009): 72–75.
22. Kuchenev, V. O., A. G. Rakut'ko, and A. S. Asadchev. "Svodnaya otsenka korrozionnoi stoikosti otel'nykh marok stali neftegazoprovodnykh trub dlya RUP "Proizvodstvennoe ob"edinenie "Belarus'neft"" *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Sukhogo* 1(80) (2020): 94–101.
23. Kolomiitsev, E.V. "Korroziionnaya stoikost' svarnykh soedinenii sudokorpusnykh materialov." *Avtomaticheskaya svarka* 4(720) (2013): 59–64.
24. Latypova, D. R., D. E. Bugai, O. R. Latypov, and V. N. Ryabukhina. "Study of the corrosion of contact steel vapors 09MN2SI/12CR18NI10TI in the process media of the column equipment." *Petroleum Engineering* 18.6 (2020): 122–129. DOI: 10.17122/ngdelo-2020–6–122–129
25. Sukhotin, A. M., ed. *Korroziya i zashchita khimicheskoi apparatury. Spravochnoe rukovodstvo. Tom 3. Korroziya pod deistviem teplonositelei i khladogentov*. M.: Khimiya, 1970.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ксенофонтов Николай Михайлович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ksenofontovnm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Лошак Виталий Николаевич —
начальник службы
гидротехнических сооружений и энергетики
ФБУ «Администрация «Волго-Балт»
191014, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Виленский пер, дом 15, литер Б
e-mail: loshak@volgo-balt.ru

Loshak, Vitaliy N. —
Head of the Hydrotechnical Structures
and Energy Service
Volgo-Balt Administration
15/B Vilenskii Lane, St. Petersburg, 191014,
Russian Federation
e-mail: loshak@volgo-balt.ru

*Статья поступила в редакцию 12 апреля 2023 г.
Received: April 12, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-455-463

DESIGNATION OF OPERATIONAL RESTRICTIONS FOR HARBOUR SHIPS ON INLAND WATERWAYS

I. S. Onishchenko^{1,2}, V. V. Karetnikov²

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

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

The existing approaches to assignment of operational restrictions for inland vessels with regard to maritime areas, as well as for inland waterways, are analyzed in the paper. The methodology for assessing the feasibility of organizing the operation of inland and mixed river-sea-going ships in wave-sheltered waters in maritime areas is studied. The additional limitations regulated by the Guidance R.015-2006 of the Russian Classification Society for such vessels while exploiting in regimes of port navigation in sea regions are considered. Research of peculiarities of wave formation on inland waterways has showed that in coastal areas the local winds and topography have significant influence. For limited water areas there are no up-to-date reference data on long-term wave and wind characteristics. Executed analysis has shown that for the decision of a problem on definition of permissible conditions of ships operation on the protected water areas on internal waterways in a port navigation mode, the approach earlier used for the Guidance requires essential changes. A list of parameters to be taken into account when justifying the conditions of inland navigation vessels operation in sheltered waters has been defined. Calculated dependence of an estimation of modes of the established wave in the limited water areas on which realization of a mode of port floating on inland waterways is possible is offered. Ranges of calculation limits for ships of the classes under review are determined. The required level of safe operation of inland waterway vessels in the basins, the rank of which doesn't correspond to the class of the vessel, is substantiated. The study results are recommended for inclusion in the regulatory framework of the Russian Classification Society.

Keywords: Inland waterways, navigation safety, inland vessels, sea vessels, mixed river-sea-going ship.

For citation:

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

УДК 656.62; 629.122

НАЗНАЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ СУДОВ ПОРТОВОГО ПЛАВАНИЯ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

И. С. Онищенко^{1,2}, В. В. Каретников²

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

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

В статье выполнен анализ существующих подходов к назначению эксплуатационных ограничений для судов внутреннего плавания применительно к морским районам, а также для внутренних водных путей. Изучена методология оценки возможности организации работы судов внутреннего и смешанного плавания на защищенных от волнения акваториях в морских районах. Рассмотрены дополнительные ограничения, регламентируемые Руководством Р.015–2006 Российского Речного Регистра (ныне — Российское Классификационное Общество) для таких судов при их эксплуатации в режимах портового плавания в морских районах. Выполненное исследование особенностей волнообразования на водоемах внутренних водных путей показало, что в прибрежных районах существенное влияние на судоходство оказывают местные ветры и рельеф местности. Отмечается, что применительно к ограниченным акваториям современные справочные данные о долгосрочных характеристиках волнения и ветра отсутствуют. Выполненный анализ показал, что для решения задачи по определению допустимых условий эксплуатации судов на защищенных акваториях на внутренних водных путях в режиме портового плавания подход, используемый для указанного

ранее Руководства, требует существенных изменений. Определен перечень параметров, которые необходимо учитывать при обосновании условий эксплуатации судов внутреннего плавания на защищенных акваториях. Предложена расчетная зависимость оценки режимов установившегося волнения в ограниченных акваториях, на которых возможна реализация режима портового плавания на внутренних водных путях. Определены диапазоны расчетных ограничений для судов рассматриваемых классов. Обоснован требуемый уровень безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания в бассейнах, разряд которых не соответствует классу судна. Результаты исследования рекомендованы для внесения в нормативную базу Российского Классификационного Общества.

Ключевые слова: внутренние водные пути, безопасность судоходства, суда внутреннего плавания, суда смешанного плавания.

Для цитирования:

Онищенко И. С. Назначение эксплуатационных ограничений для судов портового плавания на внутренних водных путях / И. С. Онищенко, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 455–463. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-455-463.

Введение (Introduction)

Внутренние водные пути (ВВП) являются важной составляющей транспортного сообщения Российской Федерации и, как известно, в ряде случаев являются единственным доступным способом доставки грузов и пассажиров, например, в районы Крайнего Севера. Согласно «Транспортной стратегии развития РФ до 2030 г.¹», долгосрочными целями развития транспортной системы являются:

- повышение мобильности населения и развитие внутреннего туризма;
- повышение пространственной связанности и транспортной доступности территорий;
- увеличение объема и скорости транзита грузов и развитие мультимодальных логистических технологий;
- цифровая и низкоуглеродная трансформация отрасли и ускоренное внедрение новых технологий.

Внутренний водный транспорт является неотъемлемой частью системы, однако он менее развит, чем автомобильный и железнодорожный. Достижение поставленных целей в части транзита грузов требует интеграции флота в существующие логистические цепочки. Так, например, в статье [1] подтверждена конкурентоспособность внутреннего водного транспорта при наличии соответствующих мероприятий и организационных мер. Необходимость возрождения высокоэффективных смешанных железнодорожно-водных, автомобиле-водных перевозок отмечена в работе [2].

Одним из наиболее популярных аспектов развития водного транспорта с экономической точки зрения является стремление к строительству современных судов с высокими технико-экономическими показателями. Необходимость реновации флота является общепризнанным фактом, активность обсуждения которого из года в год увеличивается ввиду старения судов, построенных в советский период. Следует отметить, что в последнее десятилетие наблюдается активная утилизация судов советской постройки, обусловленная их низкой экономической эффективностью.

Статистические сведения о количестве действующих судов в статьях [3]–[5] указывают на то, что количество судов внутреннего плавания будет стремительно уменьшаться в ближайшие годы. Как отмечается в статье [3], их предстоящее списание нанесет существенный ущерб внутренним перевозкам. Однако существует альтернативный вариант повышения экономической эффективности перевозок внутренним водным транспортом: совершенствование нормативной базы в части назначения ограничений работы флота. Создание гибких правовых методик, направленных на продуктивную эксплуатацию существующих судов, может не только сократить издержки судовладельцев, но и внести существенный вклад в развитие транспортной системы РФ. Так, например, ряд вопросов, касающихся эксплуатационных ограничений судов, имеет техническое решение без наличия соответствующих правовых оснований. Это касается, в первую очередь, расширения

¹ Транспортная стратегия России до 2030 г. (утв. распоряжением Правительства РФ от 22.11.2008 г. № 1734-р. г. Москва, пересмотрена в 2015 г.).

районов эксплуатации судов внутреннего плавания: несмотря на укрупненную классификацию ВВП, работа судов в бассейнах более высокого разряда возможна только после завершения процедуры переклассификации судна или изменения разряда бассейна в перечне¹, утвержденном Министерством транспорта РФ. Необходимо отметить, что обе процедуры являются трудоемкими и сопровождаются организационными мероприятиями, проведение которых требует времени.

Одним из примеров таких технических решений является эксплуатация судов на защищенных от волнения акваториях ВВП в случае, когда местные метеорологические условия исключают возможность возникновения необходимости выхода судна за пределы таких акваторий. Как отмечалось в статье [6], действующие требования Правил РКО разработаны для грузовых судов, эксплуатирующихся при большом расстоянии между местами убежищ. Таким образом, для закрытых акваторий, на которых развитие волнения ограничивается естественными факторами: глубиной и разгоном волн, может быть технически обоснована эксплуатация судов с заведомо несоответствующим классом.

Применительно к морским районам в нормативной базе РКО предусмотрена возможность организации работы судов в подобных акваториях. Так, Руководство Р.015–2006 РКО позволяет назначить таким судам режим «портового плавания»² по результатам специальных обоснований, выполненных профильными организациями. Необходимо отметить, что эксплуатация судов в режиме портового плавания широко применяется в портах Приморск и Высоцк, а также в ряде других акваторий. Как отмечается в статье [6], для ВВП ранее действовала процедура «эпизодического плавания»: допускалась эксплуатация флота в бассейнах, превосходящих класс судна разрядов при наличии дополнительных ограничений (например, сезон, допустимый режим волнения или скорость ветра). Однако такой нормативный инструмент прекратил свое существование.

Многочисленные запросы судовладельцев в части организации работы судов в бассейнах более высокого разряда по сравнению с их классом дают основание полагать, что исследование назначения допускаемых эксплуатационных ограничений судов портового плавания на ВВП является актуальным и может найти широкое практическое применение.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Началом исследования явилась оценка возможности применения для ВВП подходов, которые ранее были реализованы в Руководстве Р.015–2006 РКО в части назначения условий эксплуатации судов в режимах портового и рейдового плавания в морских районах. Анализ применимости [7] используемой методологии, по результатам которой в нормативной базе РКО и появилось Руководство³, выявил необходимость существенной корректировки используемых подходов.

Назначение допустимых условий эксплуатации судов портового плавания в морских акваториях выполнялось с помощью ограничения одного из параметров, влияющих на развитие волнения. Был выработан сравнительно простой критерий, базирующийся на объективных факторах и практически исключающий возможность развития в районе эксплуатации судна волнения, превышающего устанавливаемое ограничение. При этом во внимание принималась следующая функциональная особенность судов портового плавания: при наличии неблагоприятного прогноза погоды судно не должно следовать в место укрытия, так как разрешенная к эксплуатации акватория априори не должна представлять для него опасность.

Учитывая сложный характер волнообразования на ограниченных акваториях, для получения упрощенного способа оценки допустимости эксплуатации судов внутреннего и смешанного плавания РКО для «портового плавания» было предложено ограничиться одним из основных волнообразу-

¹ Приказ Министерства транспорта РФ от 30.05.2016 № 138 «Об утверждении перечней водных бассейнов в зависимости от их разряда». (Зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 21.06.2016, рег. № 42577). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420358949>.

² Здесь и далее под «портовым плаванием» понимается эксплуатация судов на заведомо защищенных от волнения акваториях в бассейнах, разряд которых превышает класс судна.

³ Российское классификационное общество. Предписания для судов рейдового и портового плавания и плавучих объектов. Руководство Р.015-2006. М., 2006. 16 с.

ющих факторов — *максимальным разгоном волн на защищенной акватории порта*. При этом принималось во внимание, что такие суда при неблагоприятных погодных условиях должны с весьма большой вероятностью продолжать выполнять свои функции либо, по крайней мере, отстаиваться в предписанной для них точке водоема, а не выходить за границы разрешенной для эксплуатации защищенной акватории.

В качестве аналитической зависимости, позволяющей оценить допускаемые параметры установившегося волнения на защищенной морской акватории, использовалась формула из «Строительных норм и правил» (СНиП), рекомендованная для приближенной оценки волн в заданной точке:

$$\bar{h} = 0,16 \frac{V^2}{g} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + 6,0 \cdot 10^{-3} (\bar{X})^{0,5}} \right] \right\} \cdot th \left\{ \frac{0,625 (\bar{H})^{0,8}}{1 - \left[\frac{1}{1 + 6 + 10^{-3} (\bar{X})^{0,5}} \right]} \right\}, \quad (1)$$

где $\bar{X} = \frac{gX}{V^2}$ и $\bar{H} = \frac{gH}{V^2}$;

$[h_{3\%}]_{огр}$ — допустимая высота волны, варьируемая в интервале [2,0; 4,5];

X — разгон волн на акватории, м;

H — глубина акватории, м;

$\bar{h}$ — средняя высота волны, м;

V — скорость ветра, м/с.

Как видно из формулы (1), средняя высота волны $\bar{h}$, кроме разгона волн X , зависит также от принимаемой в расчете скорости ветра V и глубины акватории H . Максимальные значения разгона волн в морских районах, приведенные впоследствии в Руководстве Р.015–2006, определены при ограниченной глубине акватории 30 м и в соответствии с Правилами допускаемых высот волн $h_{3\%}$ для всех классов судов внутреннего и смешанного плавания РКО. При этом отмечается, что допустимый разгон волн существенно зависит от принятой в расчете скорости ветра, поэтому было предложено ориентироваться на скорости ветра, близкие к 20 м/с. Это обеспечивало достаточно приемлемые с практической точки зрения вероятности возникновения ситуации, когда судно, допущенное к портовому плаванию, будет вынуждено прекратить выполнение своих функций или перемещаться по акватории порта с целью обеспечения укрытия от опасного волнения.

Приведенные в работе [7] данные позволили установить допустимый разгон волн для режима портового плавания в морских районах (табл. 1). Неудовлетворительные результаты были получены только для самого низкого класса судов «Л». Описанная методология неоднократно применялась при решении задач, направленных на организацию работы судов в прибрежных морских районах. Так, в статье [8] отмечается, что описываемые подходы не только в достаточной степени апробированы с применением Руководства Р.015–2006, но и легитимизированы в 2015 г. При этом в документе Европейской экономической комиссии¹ приведена статистика о количестве судов внутреннего и смешанного плавания РКО, которые могут эксплуатироваться в режиме портового и рейдового плавания, в том числе на ВВП. При этом актуальность указанного ранее Руководства в последние годы продолжает расти. Примером служит приведенный в статье [9] обзор применения «портового плавания» в заливе Счастья для судов класса «Р1, 2» РКО.

¹ Офиц. док. РФ. есе-TRANS-SC3-WP3-2018-07г «Предписания к судам портового, рейдового и прибрежного плавания» / 52-я сессия Рабочей группы по унификации технических предписаний и правил безопасности на внутренних водных путях // ООН, 14–16 февраля 2018 г., Женева. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/sc3wp3/ есе-TRANS-SC3-WP3-2018-07r.pdf.

Таблица 1

**Допустимые разгоны волн для судов портового плавания
различных классов в морских районах**

Основной символ в формуле класса	Допустимый разгон $[X]$, мили		
	Результат расчета		Руководство Р.015–2006
	$V = 20$ м/с	$V = 25$ м/с	
Л	0,25	–	–
Р	1,1	0,6	1,0
О	3,0	1,8	3,0
О-ПР	4,2	2,4	4,0
М и М-ПР	11,0	6,0	10,0
М-СП	17,4	8,9	15,0

Исследование применимости описанного подхода для решения аналогичных задач на ВВП выявило необходимость существенного уточнения используемой методологии. Это объясняется, в первую очередь, отсутствием или устареванием открытых справочных данных по ветру и волнению на акваториях, находящихся за границами морских районов. В отличие от морских районов [10], [11], для ВВП на протяжении нескольких десятилетий не проводились планомерные исследования режимов волнения и ветра для крупных водоемов страны. В статье [6] выполнен обзор существующих источников: систематические данные для ВВП были получены в работах ЦНИИЭВТ под руководством А. Ю. Зарбаилова в 60-е гг. XX в. при подготовке в 1975 г. Правил Речного Регистра. В начале 2000-х гг. эти данные уточнялись только в отдельных работах для Ладожского и Онежского озер в части режимов волнения, откуда следует, что сведения по долгосрочным характеристикам волнения на ВВП не имеют периодических уточнений с учетом получения новых исходных данных и методов их обработки. Однако известные гидрометеорологические источники позволяют полагать, что местные условия оказывают также значительное влияние на долгосрочные характеристики ветра. В связи с этим предложено ориентироваться на средние скорости ветра (осреднение за 10 мин), значения которых получены пересчетом регламентируемых Правилами РКО при внезапном увеличении скорости ветра (порывах ветра).

Немаловажным фактором также являются условия местного волнообразования в прибрежных районах ВВП, оказывающие существенное влияние на развитие волнения, и, безусловно, требующие учета при разработке подходов. Таким образом, для условий портового плавания судов на ВВП ограничиться постоянной скоростью ветра не представляется возможным.

Задание глубины защищенной от волнения акватории в качестве константы на ВВП по аналогии с морскими районами также представляется нецелесообразным, так как это существенно ограничивает гибкость методологии назначения допускаемых эксплуатационных ограничений. Учитывая разнообразие физико-геологических особенностей водоемов России, можно с уверенностью утверждать о непрактичности задания постоянной глубины в расчетных зависимостях. Таким образом, в качестве задаваемых исходных параметров, характеризующих условия эксплуатации судов в режиме портового плавания на ВВП, необходимо принять: класс судна, разрядность акватории в соответствии с классификацией нормативных документов, глубину акватории, разгон волн на акватории, расчетную скорость ветра.

В данном случае класс судна связан с регламентируемыми допускаемыми высотами волн $[h_{1\%}]$ или $[h_{3\%}]$, а разряд — со скоростью порывов ветра, регламентированной Правилами РКО. Для расчета средней высоты волны установившегося волнения ограниченных акваторий следует использовать формулу (1) с последующим пересчетом данного параметра в высоту волны произвольной обеспеченности с помощью аппроксимации, предложенной Б. Х. Глуховским для условий мелководья [7]:

$$F(h) = 1 - \exp \left\{ - \frac{\pi}{4 \left(1 + \frac{h^*}{\sqrt{2\pi}} \right)} \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)^{\frac{2}{1-h^*}} \right\} \quad (2)$$

где $h^* = \bar{h} / H$.

Так, совместное применение формул (1) и (2) позволило выразить зависимость разгона волн X от глубины акватории H для условий мелководья при наличии ограничений, нормируемых Правилами РКО допускаемых высот волн $[h_1\%]$ и $[h_3\%]$.

Результаты (Results)

Предложена расчетная зависимость, на основе которой выполнены серийные расчеты для определения зависимости разгона волн X от глубины акватории H . Результаты расчетов представлены на рисунке в виде графиков функции $X = f(H)$ для четырех возможных случаев эксплуатации судов внутреннего плавания в защищенных от волнения акваториях водных бассейнов, класс которых не соответствует их разряду:

- суда класса «Р» ($[h_1\%] \leq 1,2$ м) в бассейнах разряда «О»;
- суда класса «О» ($[h_1\%] \leq 2,0$ м) в бассейнах разряда «М»;
- суда класса «О-ПР» ($[h_3\%] \leq 2,0$ м) в бассейнах разряда «М»;
- суда класса «Р» ($[h_1\%] \leq 1,2$ м) в бассейнах разряда «М».

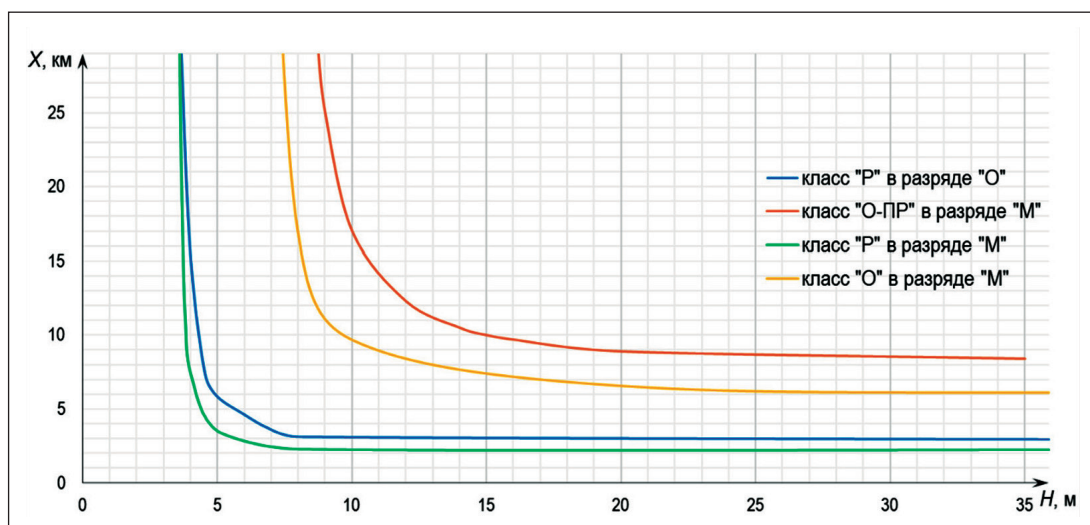


График зависимости $X = f(H)$
для различных случаев эксплуатации судов
в режиме портового плавания на ВВП

Глубины и разгон волн на акваториях, находящихся на ВВП, имеют большой диапазон, однако участок изменения поведения графика зависимости $X = f(H)$ весьма локален, особенно в части судов класса «Р», имеющих наименьшую допускаемую высоту волн: $[h_1\%] = 1,2$ м. Полученные зависимости было предложено представить в форме табл. 2 с целью удобства определения допустимого разгона волн в зависимости от заданной глубины акватории. При этом были введены следующие термины:

- «разгон волн» — расстояние от наиболее удаленной береговой черты до места работы судна или плавучего объекта;
- «глубина акватории» — максимальная глубина, определяемая с учетом возможных нагонных явлений на защищенной от волнения акватории.

Таблица 2

**Зависимость разгона волн от глубины водоема
для режима портового плавания на ВВП**

Основной символ в формуле класса	Разряд бассейна	Параметр	Зависимость допускаемого разгона волн X от глубины акватории H при высоте волны, соответствующей основному символу в формуле класса			
Р	О	H , м	$0 \leq H \leq 3,5$	$3,5 < H \leq 4,7$	$4,7 \leq H \leq 7,6$	$H > 7,6$
		X , км	Неограничен	$X = -12,6H + 65,15$	$X = -1,07H + 11,0$	$X = 2,9$
О	М	H , м	$0 \leq H \leq 6,0$	$6,0 < H \leq 8,2$	$8,2 \leq H \leq 12,3$	$H > 12,3$
		X , км	Неограничен	$X = -18,97H + 167,8$	$X = -1,49H + 24,4$	$X = 6,1$
Р	М	H , м	$0 \leq H \leq 3,0$	$3,0 < H \leq 3,83$	$3,83 \leq H \leq 5,2$	$H > 5,2$
		X , км	Неограничен	$X = -73,56H + 288,5$	$X = -3,3H + 19,4$	$X = 2,24$
О-ПР	М	H , м	$0 \leq H \leq 7,9$	$7,9 < H \leq 9,8$	$9,8 \leq H \leq 15,0$	$H > 15,0$
		X , км	Неограничен	$X = -12,5H + 137,5$	$X = -1,27H + 27,44$	$X = 8,4$

Предложенный подход позволяет учесть особенности акватории при работе в режиме портового плавания, а также показывает вполне закономерный результат, в связи с чем был использован при подготовке новой редакции Руководства Р.015–2006. При этом была предусмотрена возможность выполнения дополнительных гидрометеорологических исследований с целью учета развития волнения на рассматриваемой акватории и рельефа дна при обосновании эксплуатации судов в режиме портового плавания. Данный подход в полной мере применим к плавучим объектам, которые были введены в Правила РКО в 2019 г. и представляют собой несамоходное плавучее сооружение, не являющееся судном, в том числе дебаркадер, плавучий (находящийся на воде) дом, гостиница, ресторан, понтон, плот, наплавной мост, плавучий причал и другое техническое сооружение подобного рода.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ особенностей эксплуатации судов внутреннего плавания в акваториях морских районов, в которых волнообразование ограничено географическими особенностями водоема. Оценка применимости подходов, использованных при разработке Руководства Р.015–2006, устанавливает допускаемые эксплуатационные ограничения для судов портового и рейдового плавания в морских районах. Выявленный дефицит долгосрочных справочных данных по режимам ветра и волнения на ВВП указывает на необходимость существенного ограничения используемых подходов для установления допускаемых эксплуатационных ограничений судов портового плавания на ВВП.

2. Предложена зависимость разгона волн от максимальной глубины акватории, на которой планируется эксплуатация судна в режиме портового плавания на ВВП. Результаты расчетов, выполненных по указанной зависимости, показали удовлетворительный результат для судов классов «Р», «О» и «О-ПР» при эксплуатации в бассейнах разряда «О» и «М». Разработаны предложения по назначению допустимых условий эксплуатации судов с классом РКО в режиме портового плавания на ВВП, основанные на результатах выполненного исследования.

3. Разработанные предложения рассмотрены на научно-техническом совете при РКО и рекомендованы к включению в нормативную базу РКО. Уточнение и детализация с учетом особенностей ВВП используемых ранее подходов, реализованных для режима портового плавания в морских районах, позволяют считать обеспеченной безопасностью эксплуатации судов на защищенных акваториях ВВП в бассейнах более высокого разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Телегин А. И. ВВТ в национальной транспортной системе / А. И. Телегин, Г. Н. Чуплыгин, В. Н. Шабров // Транспортное дело России. — 2019. — № 2. — С. 52–54.
2. Шабров В. Н. Обоснование эффективности комбинированных перевозок автомобилей с участием речного транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / В. Н. Шабров. — Н. Новгород, 2017. — 181 с.
3. Егоров Г. В. Анализ закономерностей списания речных круизных судов и прогноз состава речного флота с определением наиболее востребованных типов судов для конверсии и модернизации / Г. В. Егоров, А. Г. Егоров // Морской вестник. — 2019. — № 1 (69). — С. 21–27.
4. Мальцев А. Г. Экономическое развитие водного транспорта в современной России / А. Г. Мальцев // StudNet. — 2022. — Т. 5. — № 3. — С. 1393–1400.
5. Егоров Г. В. Анализ состояния и путей развития внутреннего водного транспорта России / Г. В. Егоров [и др.] // Речной транспорт (XXI век). — 2021. — № 3 (99). — С. 39–44.
6. Онищенко И. С. Анализ ветроволновых характеристик внутренних водных путей России / И. С. Онищенко // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли: материалы молодежного науч. форума студ. и асп. трансп. вузов с междунар. участием. — М.: Изд-во «Перо», 2019. — С. 114–117.
7. Разработка требований для судов и плавучих объектов портового и рейдового плавания, находящихся на внутренних водных путях: отчет по этапу 4 НИР по договору № Р153/19. № 253-Р153/2019–04 / Рук. работы Ю. И. Ефименков, отв. исп. И. С. Онищенко. — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2019. — 64 с.
8. Гуляев И. А. Опыт классификации судов малого тоннажа, прибрежного, портового и рейдового плавания / И. А. Гуляев, Е. П. Роннов, Е. Г. Бурмистров // Речной транспорт (XXI век). — 2020. — № 2 (94). — С. 31–36.
9. Онищенко И. С. Эксплуатация судов внутреннего плавания в заливе Счастья / И. С. Онищенко, А. Н. Паранюк // Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: традиции, инновации (РИВВТ-2021): сб. тр. межвузовской науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых, СПб., 01 декабря 2021 г. — СПб.: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова», 2022. — С. 86–89.
10. Лопатухин Л. И. Справочники по волновому климату морей — от традиционных изданий к компьютерным технологиям / Л. И. Лопатухин [и др.] // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: сб. тез. Всеросс. науч.-практ. конф. — СПб.: Российский гос. гидрометеорологический ун-т, 2019. — С. 329–330.
11. Шилина Н. В. Система численного прогнозирования погоды / Н. В. Шилина // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2020. — № 8. — С. 127–130. DOI: 10.37882/2223–2966.2020.08.36.

REFERENCES

1. Telegin, A., G. Chuplygin, and V. Shabrov. "IWT national transport system." *Transport business of Russia* 2 (2019): 52–54.
2. Shabrov, V. N. Obosnovanie effektivnosti kombinirovannykh perevozok avtomobilei s uchastiem rechnogo transporta. PhD diss. N. Novgorod, 2017.
3. Egorov, G. V., and A. G. Egorov "Analiz zakonornostej spisaniya rechnykh kruiznykh sudov i prognoz sostava rechnogo flota s opredeleniem naibolee vostrebovannykh tipov sudov dlya konversii i modernizacii." *Morskoy vestnik* 1(69) (2019): 21–27.
4. Maltsev, Artemy Gennadievich. "Economic development of water transport in modern Russia." *StudNet* 5.3 (2022): 1393–1400.
5. Egorov, G., Y. Matveev, G. Chuplygin, and V. Shabrov. "The analysis of condition and ways of development of inland water transport in Russia." *River transport (XXIst century)* 3(99) (2021): 39–44.
6. Onishchenko, I.S. "Analiz vetrovolnovykh kharakteristik vnutrennikh vodnykh putei Rossii." *Aktual'nye aspekty i prioritetnye napravleniya razvitiya transportnoi otrasli: Materialy Molodezhnogo nauchnogo foruma studentov i aspirantov transportnykh vuzov s mezhdunarodnym uchastiem*. M.: Izdatel'stvo "Pero", 2019. 114–117.
7. Onishchenko, I. S. Razrabotka trebovaniy dlya sudov i plavuchikh ob'ektov portovogo i reidovogo plavaniya, nakhodyashchikhsya na vnutrennikh vodnykh putyakh. Scientific report. SPb.: AO «TsNIIMF», 2019.

8. Gulyaev, I., E. Ronnov, and E. Burmistrov. "The experience of classification of small tonnage, coastal, port and road navigation vessels." *River transport (XXIst century)* 2(94) (2020): 31–36.

9. Onishchenko, I.S., and A. N. Paranyuk. "Ekspluatatsiya sudov vnutrennego plavaniya v Zalive Schast'ya." *Razvitie infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta: traditsii, innovatsii (RIVVT-2021): Sbornik trudov mezhevuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2022. 86–89.

10. Lopatoukhin, L., A. Boukhanovsky, A. Kalyuzhnaya, and E. Chernysheva. "Wave climate handbooks — from traditional publications to high performance computing." *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoichivogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii: Sbornik tezisov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Rossiiskii gosudarstvennyi gidrometeorologicheskii universitet, 2019. 329–330.

11. Shilina, Natalia V. "Numerical weather forecasting system." *Modern Science: actual problems of theory and practice* 8 (2020): 127–130. DOI: 10.37882/2223–2966.2020.08.36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Онищенко Ирина Станиславовна —

аспирант, заведующий сектором

Научный руководитель:

Каретников Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

АО «ЦНИИМФ»

191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А

e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru,

irris291@gmail.com

Каретников Владимир Владимирович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Onishchenko, Irina S. —

Postgraduate, Head of sector

Supervisor:

Karetnikov, Vladimir V.

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

CNIIMF, JSC

6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,

Russian Federation

e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru,

irris291@gmail.com

Karetnikov, Vladimir V. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 2 марта 2023 г.

Received: March 2, 2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-464-475

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF AIR HEATING OF THE ICEBREAKER ANTI-ICING DEVICE AT THE COMPRESSOR INLET

V. A. Zhukov, A. E. Stepanov, V. L. Erofeev

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

Anti-icing devices that provide increased ice penetration are widely used on modern icebreakers. The devices based on the pneumatic pressurization of the icebreaker hull with air pumped by a special compressor are most common. When operating at low temperatures, there is a danger of compressor failure due to icing of the compressor intake tract. To protect the receiving path, it is necessary to increase the temperature of the air entering the compressor to safe values. Possible heating methods are recirculation of compressed air in the compressor and its heating in a special heat exchanger. A diagram of an anti-icing system that allows you to implement both methods of air heating is presented in the paper; the principle of its operation is described. An urgent problem of selecting the most preferred method of air heating is considered in the paper. As an evaluation criterion, it is proposed to use the energy costs necessary to ensure air heating, cooling parameters of modern internal combustion engines with a high level of boost and advanced engines. To solve this problem, an algorithm that takes into account the features of the operation of the anti-icing device compressor, the requirements for the temperature of the receiving air, the properties of heat carriers is proposed. The calculation method is based on the classical equations of thermodynamics and heat transfer. The results of the calculations performed allow us to compare the energy costs for ensuring an increase in air temperature to the required values when using various methods of heat supply. The conclusions drawn on the basis of the calculations carried out allow us to conclude that the most rational way to warm up the intake air of the compressor of the anti-icing device is the joint use of recirculation and a heat exchanger. A promising direction for improving anti-icing devices is the optimization of the temperature modes of the compressor operation, rationalization of the supplied heat distribution, automation of the control for the temperature regime of the pneumatic boost.

Keywords: icebreaker fleet, ice permeability, anti-icing devices, pneumatic boost, compressor, air heating, recirculation, heat exchanger, power costs

For citation:

Zhukov, Vladimir A., Evgenij A. Stepanov, and Valentin L. Erofeev. "Evaluation of the effectiveness of air heating of the icebreaker anti-icing device at the compressor inlet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 464–475. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-464-475.

УДК 629.5.06

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ЛЕДОКОЛА НА ВХОДЕ В КОМПРЕССОР

В. А. Жуков, Е. А. Степанов, В. Л. Ерофеев

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

Темой исследования являются противообледенительные устройства, обеспечивающие повышение ледопроницаемости, широко применяемые на современных ледоколах. Отмечается, что наиболее распространенными являются устройства, в основе которых лежит пневмообдув корпуса ледокола воздухом,

нагнетаемым специальным компрессором. При работе в условиях низких температур возникает опасность выхода компрессора из строя вследствие обледенения его приемного тракта, для защиты которого необходимо повышать температуру воздуха, поступающего в компрессор, до безопасных значений. Возможными способами подогрева являются рециркуляция сжатого в компрессоре воздуха и его подогрев в специальном теплообменном аппарате. В статье представлена схема противообледенительной системы, позволяющей реализовать оба способа подогрева воздуха с описанием принципа ее действия. Статья посвящена актуальной проблеме, а именно выбору наиболее предпочтительного способа подогрева воздуха. В качестве критерия оценки предлагается использовать энергетические затраты, необходимые для обеспечения подогрева воздуха, параметров охлаждения современных двигателей внутреннего сгорания с высоким уровнем форсированности и перспективных двигателей. Для решения поставленной задачи предложен алгоритм, учитывающий особенности работы компрессора противообледенительного устройства, требования, предъявляемые к температуре приемного воздуха, а также свойства теплоносителей. Расчетная методика базируется на классических уравнениях термодинамики и теплопередачи. Результаты выполненных расчетов позволяют сравнить энергетические затраты на обеспечение повышения температуры воздуха до требуемых значений при использовании различных способов подвода теплоты. На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что наиболее рациональным способом подогрева приемного воздуха компрессора противообледенительного устройства является совместное использование рециркуляции и теплообменного аппарата. Перспективным направлением совершенствования противообледенительных устройств является оптимизация температурных режимов работы компрессора, рационализация распределения подводимой теплоты, автоматизация управления температурным режимом пневмообдува.

Ключевые слова: ледокольный флот, ледовая проходимость, противообледенительные устройства, пневмообдув, компрессор, подогрев воздуха, рециркуляция, теплообменный аппарат, затраты мощности

Для цитирования:

Жуков В. А. Оценка эффективности подогрева воздуха противообледенительного устройства ледокола на входе в компрессор / В. А. Жуков, Е. А. Степанов, В. Л. Ерофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 464–475. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-464-475.

Введение (Introduction)

Совершенствование транспортной инфраструктуры Российской Федерации, предусмотренной государственной программой [1], невозможно без освоения акваторий Северного ледовитого океана и обеспечения устойчивого судоходства по Северному морскому пути. Для решения данной задачи необходимо создание судов, способных обеспечить функционирование транспортной системы [2]. Развитие ледокольного флота является одним из наиболее перспективных и важных направлений развития отечественного судостроения. В соответствии с указом Президента Российской Федерации от 5 марта 2020 г. «Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» необходимо обеспечить формирование ледокольного флота за счет постройки высокотехнологичных судов, оснащенных эффективными энергетическими установками. Важнейшую роль в обеспечении безопасного судоходства в арктических акваториях играют суда ледокольного флота [3]–[5]. Выбор технических характеристик судов-ледоколов должен способствовать решению задач повышения ледовой ходкости и ледопроеходимости. Данной проблеме посвящены работы [6], [7].

Ряд проектируемых и строящихся в настоящее время линейных ледоколов предназначен для эксплуатации в арктической зоне и акваториях Северного морского пути, где температура окружающего воздуха может понижаться до минус 50 °С. Указанные особенности условий эксплуатации приводят к появлению дополнительных требований и необходимости новых конструкторских решений, направленных на обеспечение надежной и эффективной работы ледокола, его оборудования и устройств. Для современных и перспективных линейных ледоколов характерным является наличие противообледенительных устройств (ПОУ), эффективность которых показана в работах [8], [9].

В работах [10], [11] выполнен анализ влияния на мощность, потребляемую турбонагнетательным аппаратом (ТНА), конструктивных характеристик корпуса ледокола и параметров воздуха, подаваемого под давлением, несколько превышающим гидростатическое к отверстиям в наружной обшивке корпуса, расположенным по бортам в подводной части носовой оконечности судна.

ТНА является важнейшим элементом ПОУ, надежность работы которого определяет эффективность функционирования всей системы. Конструктивные особенности ТНА рассмотрены в работах [12], [13].

Одним из вопросов, решаемых при проектировании системы пневмообмыва, является выполнение требований, предъявляемых к температуре воздуха, поступающего к компрессору ТНА. Для защиты приемного тракта компрессора от обледенения и исключения возможных вследствие этого повреждений компрессора температура подаваемого воздуха должна быть не ниже минус 15 С.

Подогрев подаваемого воздуха к компрессору противообледенительного устройства может осуществляться следующими способами:

- рециркуляцией части горячего воздуха из тракта нагнетания во всасывающий коллектор компрессора, где происходит смешивание с холодным воздухом, поступающим из атмосферы, и повышение его температуры;
- подогревом воздуха, поступающего из окружающей среды, в теплообменном аппарате, установленном в приемной шахте ТНА.

Каждый из указанных способов имеет следующие характерные недостатки:

- рециркуляцию, снижающую количество воздуха, подаваемого к выпускным соплам и увеличивающую затраты мощности на привод ТНА;
- установку дополнительного подогревателя воздуха, увеличивающую нагрузку на вспомогательную котельную установку ледокола, которая приводит к увеличению расхода топлива и количества выбросов в атмосферу.

Целью проведенных исследований являлась оценка влияния способов подогрева воздуха, подаваемого к компрессору, на эффективность работы противообледенительного устройства, определение энергетических затрат, необходимых для требуемого повышения температуры воздуха перед компрессором и выработка рекомендаций по выбору наиболее рационального из них.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Схема противообледенительного устройства. Принципиальная схема воздухопроводов ПОУ ледокола приведена следующем на рисунке.

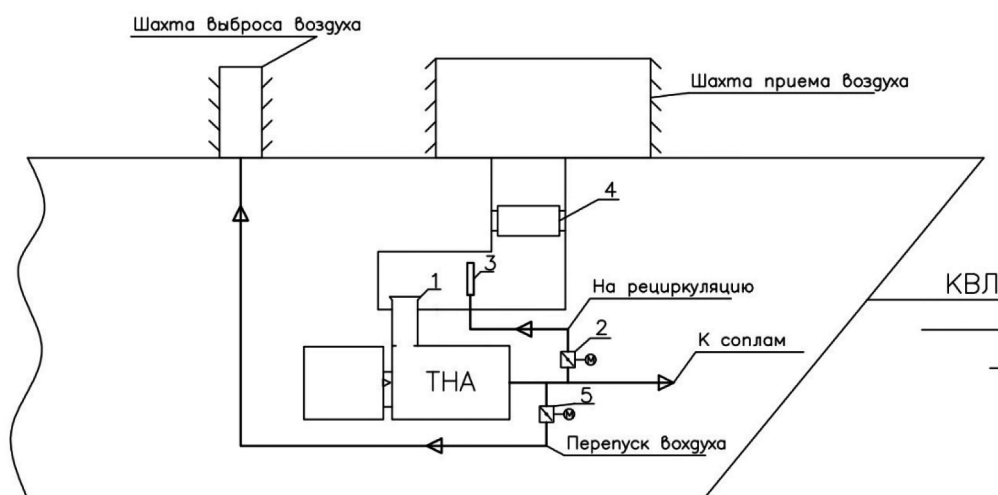


Схема воздухопроводов противообледенительного устройства

ТНА — турбонагнетательный аппарат (компрессор); КВЛ — конструктивная ватерлиния;

1 — приемный патрубок компрессора; 2 — затвор рециркуляции воздуха;

3 — распылительный коллектор воздуха рециркуляции;

4 — подогреватель приемного воздуха; 5 — затвор перепуска воздуха

В канале приема воздуха компрессором предусмотрена шахта, расположенная на палубе судна, и трубопровод, в котором установлены подогреватель приемного воздуха 4 и распылитель воздухопровода рециркуляции теплого воздуха из нагнетательной магистрали компрессора 3. Ко-

личество воздуха рециркуляции регулируется затвором 2, оборудованным электроприводом. Управление затвором в основном производится в автоматическом режиме, но также возможно и ручное управление.

При использовании системы подогрева подаваемого воздуха теплообменный аппарат 4 устанавливается в канале приема воздуха. Предлагается использовать рекуперативный теплообменный аппарат, конструкция которого должна обладать малым аэродинамическим сопротивлением. Учитывая условия работы, в качестве греющего теплоносителя необходимо применять жидкость с низкой температурой кристаллизации (например, водный раствор пропиленгликоля). Основанием для такого решения являются данные, приведенные в работе [14].

Канал перепуска воздуха предназначен для выброса воздуха в атмосферу во время пуска и остановки компрессора, а также при угрозе помпажа компрессора. Количество перепускаемого воздуха регулируется автоматическим затвором 5.

Подогрев приемного воздуха компрессора рециркуляцией сжатого воздуха. С целью подогрева воздуха перед входом в компрессор внутри канала приема воздуха предусмотрен распределительный коллектор 3, к которому подведен воздухопровод рециркуляции теплого воздуха, нагнетаемого компрессором. Количество воздуха рециркуляции регулируется затвором 2, оборудованным электроприводом. Управление затвором в основном производится в автоматическом режиме, но также возможно и ручное управление. При рециркуляции подогреватель 4 не включен в работу или вообще отсутствует на судне.

Для определения расхода воздуха рециркуляции и мощности подогревателя воздуха перед входом компрессора необходимо рассчитать параметры компрессора. Определение основных параметров компрессора выполнялось с использованием следующих уравнений:

$$P_{\text{вых}} = P_a + P_{\text{нап}} + P_{\text{г}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ — давление воздуха на выходе из компрессора, Па;

$P_a = 101325$ — атмосферное давление, Па;

$P_{\text{нап}}$ — аэродинамическое сопротивление трубопровода от напорного фланца компрессора до выпускного сопла, Па (принимается $P_{\text{нап}} = 35000$ Па);

$P_{\text{г}}$ — гидростатическое давление воды на уровне выпускных сопел, Па.

$$P_{\text{вх}} = P_a - P_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{вх}}$ — давление воздуха перед приемным фланцем компрессора, Па;

$P_{\text{к}}$ — аэродинамическое сопротивление воздухопровода от приемной решетки до приемного фланца компрессора, Па (при проведении расчетов принимаем $P_{\text{к}} = 2000$ Па).

Степень повышения давления в компрессоре π_k определяется как отношение выходного и входного давлений:

$$\pi_k = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (3)$$

Массовая производительность компрессора M_k рассчитывается как произведение расхода воздуха на 1 пог. м длины омываемой поверхности на длину омываемой воздухом поверхности:

$$M_k = M_{\text{к1}} L_{\text{ом}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{к1}}$ — массовый расход воздуха, приходящийся на 1 пог. м длины омываемой поверхности, кг/м;

$L_{\text{ом}}$ — длина омываемой воздухом поверхности, м.

Для определения температуры воздуха на выходе из компрессора следует воспользоваться формулой адиабатического КПД компрессора η_a :

$$\eta_a = \frac{L_{ад}}{L_k}, \quad (5)$$

где $L_{ад}$ — работа адиабатного сжатия, Дж;

L_k — работа политропного сжатия в компрессоре, Дж.

В соответствии с [15] удельную работу адиабатного сжатия $l_{ад}$ и удельную работу политропного сжатия в компрессор $l_{пол}$ можно определить по формулам:

$$l_{ад} = c_p (T_{ад} - T_{вх}); \quad (6)$$

$$l_{пол} = \frac{n}{n-1} R T_{вх} \left(\pi_k^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right), \quad (7)$$

где c_p — массовая теплоемкость в изобарном процессе, кДж/(кг·К);

$T_{вх}$ — температура воздуха на входе в компрессор ПОУ, К;

$T_{вых}$ — температура воздуха на выходе из компрессора ПОУ, К;

$T_{ад}$ — адиабатическая температура сжатия, К.

Формула адиабатического КПД компрессора имеет вид

$$\eta_a = \frac{T_{ад} - T_{вх}}{T_{вых} - T_{вх}}. \quad (8)$$

Следовательно, температура воздуха на выходе из компрессора

$$T_{вых} = T_{вх} + \frac{T_{ад} - T_{вх}}{\eta_a}. \quad (9)$$

В соответствии с уравнением состояния идеального газа при адиабатическом сжатии температура адиабатического сжатия $T_{ад}$, имеет вид

$$T_{ад} = T_{вх} \pi_k^{\frac{k}{k-1}}, \quad (10)$$

где $k = 1,41$ — показатель адиабаты.

После подстановки и сокращения общих членов уравнение температуры воздуха на выходе из компрессора принимает вид

$$T_{вых} = T_{вх} \left(1 + \frac{\pi_k^{\frac{k}{k-1}} - 1}{\eta_a} \right). \quad (11)$$

В соответствии с [15] принимаем $\eta_{ад} = 0,87$.

Для расчета коэффициента рециркуляции воздуха воспользуемся уравнением теплового баланса:

$$c_{вх} M_k T_{вх} = c_{нар} M_{нар} T_{нар} + c_{вых} M_{рец} T_{вх}, \quad (12)$$

где $c_{вх}$ — удельная теплоемкость воздуха при температуре на входе в компрессор, кДж/(кг·К);

$c_{нар}$ — удельная теплоемкость воздуха при температуре наружного воздуха, кДж/(кг·К);

$M_{нар}$ — массовый расход наружного воздуха, кг/с;

$c_{вых}$ — удельная теплоемкость воздуха при температуре наружного воздуха, кДж/(кг·К);

$M_{рец}$ — массовый расход воздуха рециркуляции, кг/с;

$T_{нар}$ — температура наружного воздуха, К.

Поскольку коэффициент рециркуляции $k_{рец} = \frac{M_{рец}}{M_k}$, массовая производительность компрессора $M_k = M_{нар} + M_{рец}$, можно представить массовые расходы в следующем виде:

$$M_{\text{нар}} = (1 - k_p) M_k; \quad (13)$$

$$M_{\text{рец}} = k_p \cdot M_k. \quad (14)$$

Принимаем $c_{\text{вх}} = c_{\text{нар}} = c_{\text{вых}} = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

При подстановке массовых расходов (13), (14) в формулу (12) и сокращении теплоемкостей уравнение теплового баланса принимает вид:

$$M_k T_{\text{вх}} = (1 - k_p) M_k T_{\text{нар}} + k_p M_k T_{\text{вых}}; \quad (15)$$

$$T_{\text{вх}} = T_{\text{нар}} - k_p M_k T_{\text{нар}} + k_p T_{\text{вых}}. \quad (16)$$

Коэффициент рециркуляции $k_{\text{рец}}$ определяется по формуле

$$k_{\text{рец}} = \frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{нар}}}{T_{\text{вых}} - T_{\text{нар}}}. \quad (17)$$

Мощность, затрачиваемая на привод воздушного компрессора ТНА, определяется для адиабатного и политропного сжатия, соответственно, по формулам:

$$N_{\text{ад}} = \frac{M_k l_{\text{ад}}}{\eta_{\text{ад}} \eta_{\text{мех}}}; \quad (18)$$

$$N_{\text{ад}} = \frac{M_k l_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}} \eta_{\text{мех}}}, \quad (19)$$

где $\eta_{\text{ад}}$ — адиабатный КПД, принимаемый равным 0,87;

$\eta_{\text{пол}}$ — политропный КПД, принимаемый равным 0,8;

$\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД, принимаемый равным 0,9;

Подогрев приемного воздуха в теплообменном аппарате. При использовании системы подогрева подаваемого воздуха теплообменный аппарат 4 устанавливается в канале приема воздуха. Передача теплоты холодному воздуху осуществляется от греющего теплоносителя, который должен быть не замерзающим при температуре до минус 50 °С. В качестве горячего теплоносителя предлагается использовать 60 %-й водный раствор пропиленгликоля. При этом метод рециркуляции остается резервным способом подогрева подаваемого воздуха.

Параметры подогревателя приемного воздуха определяются с использованием следующих уравнений:

1. Тепловая мощность подогревателя воздуха, подаваемого в компрессор $N_{\text{п}}$, определяется по формуле

$$N_{\text{п}} = M_k (c_{\text{вх}} T_{\text{вх}} - c_{\text{нар}} T_{\text{нар}}). \quad (20)$$

2. Для определения массового расхода горячего теплоносителя через рекуперативный теплообменный аппарат можно воспользоваться уравнением теплового баланса:

$$c_{\text{в}} M_{\text{в}} \Delta T_{\text{в}} = c_{\text{гт}} M_{\text{гт}} \Delta T_{\text{гт}} \quad (21)$$

где $c_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воздуха при средней температуре теплообменном аппарате, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

$c_{\text{гт}}$ — удельная теплоемкость горячего теплоносителя (водного раствора пропиленгликоля), $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

$M_{\text{в}}$ — массовый расход воздуха, $\text{кг}/\text{с}$;

$M_{\text{гт}}$ — массовый расход горячего теплоносителя, $\text{кг}/\text{с}$;

$\Delta T_{\text{в}}$ — разность температур воздуха на выходе из теплообменного аппарата и входе в него, К ;

$\Delta T_{\text{гт}}$ — разность температур горячего теплоносителя, соответственно, на входе в теплообменный аппарат и выходе из него, К .

Принимаем, что греющий теплоноситель подается в теплообменный аппарат при температуре $T_{ГТ1} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и охлаждается до температуры $T_{ГТ2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Массовый расход греющего теплоносителя $M_{ГТ}$, кг/с, определяется по формуле

$$M_{ГТ} = \frac{N_{п}}{(c_{ГТ1}T_{ГТ1} - c_{ГТ2}T_{ГТ2})} = \frac{N_{п}}{\bar{c}_{ГТ}T_{ГТ}}, \quad (22)$$

где $c_{ГТ1} = 3,65$ — удельная теплоемкость 60%-го водного раствора пропиленгликоля при температуре $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, кДж/(кг·К);

$c_{ГТ2} = 3,55$ — удельная теплоемкость 60%-го водного раствора пропиленгликоля при температуре $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, кДж/(кг·К);

$\bar{c}_{ГТ}$ — средняя теплоемкость горячего теплоносителя в заданном интервале температур, кДж/(кг·К).

Затраты мощности, необходимой для обеспечения циркуляции горячего теплоносителя, определяются по формуле

$$N_{ГТ} = \frac{M_{ГТ}\Delta p_{ц}}{\eta_{мех.н}}, \quad (23)$$

где $\Delta p_{ц}$ — давление, создаваемое циркуляционным насосом горячего теплоносителя (принимается $\Delta p_{ц} = 0,2$ МПа);

$\eta_{мех.н}$ — механический КПД циркуляционного насоса (принимается равным 0,9).

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

По описанной методике были выполнены расчеты параметров компрессора и двух способов подогрева приемного воздуха.

Для расчета приняты следующие исходные данные:

— массовый расход воздуха, приходящийся на 1 пог. м длины омываемой поверхности, принимаемый для пр. 10521 и 22220, $M_{к1} = 0,4$ кг/(с·м) [10];

— длина по КВЛ, $L_{КВЛ} = 150$ м;

— длина омываемой части, $L_{ом} = 0,75$ м;

— осадка по КВЛ $= 9,5$ м;

Расстояние сопел выпускного коллектора от основной плоскости, $H_c = 0,6$ м.

Результаты расчета параметров компрессора ТНА приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры компрессора противообледенительного устройства

Наименование величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Атмосферное давление	p_a	Па	101325
Гидростатическое давление воды на уровне выпускных сопел	p_r	Па	89488
Аэродинамическое сопротивление воздуха от напорного фланца компрессора до выпускного сопла	$p_{внап}$	Па	35000
Давление воздуха на выходе из компрессора	$p_{вых}$	Па	225813
Аэродинамическое сопротивление воздуховода от приемной решетки до приемного фланца компрессора	p_k	Па	2000
Давление воздуха перед приемным фланцем компрессора	$p_{вх}$	Па	99325
Степень повышения давления в турбокомпрессоре	π_k	—	2,273
Массовая производительность компрессора без рециркуляции	$M_{нар}$	кг/с	21
Температура воздуха на выходе из компрессора	$T_{вых}$	К	336,4
	$t_{вых}$	$^{\circ}\text{C}$	63,4

Окончание табл. 1

Температура воздуха на входе в компрессор	$T_{\text{вх}}$	К	258
	$t_{\text{вх}}$	°С	–15
Температура наружного воздуха	$T_{\text{нар}}$	К	223
	$t_{\text{нар}}$	°С	–50
Удельная работа адиабатного сжатия воздуха в компрессоре	$l_{\text{ад}}$	кДж/кг	70,35
Удельная работа политропного сжатия воздуха в компрессоре	$l_{\text{пол}}$	кДж/кг	67,34
Мощность, затрачиваемая на привод компрессора при адиабатном сжатии без рециркуляции	$N_{\text{ад}}$	МВт	1,73
Мощность, затрачиваемая на привод компрессора при политропном сжатии без рециркуляции	$N_{\text{пол}}$	МВт	1,79

В табл. 2 приведены расчеты энергетических затрат при подогреве воздуха, поступающего в компрессор при частичной рециркуляции сжатого воздуха.

Таблица 2

Параметры компрессора при рециркуляции воздуха

Наименование величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Массовая производительность компрессора без рециркуляции	$M_{\text{нар}}$	кг/с	30
Температура воздуха на выходе из компрессора	$T_{\text{вых}}$	К	336,4
	$t_{\text{вых}}$	°С	63,4
Температура воздуха на входе в компрессор	$T_{\text{вх}}$	К	258
	$t_{\text{вх}}$	°С	–15
Температура наружного воздуха	$T_{\text{нар}}$	К	223
	$t_{\text{нар}}$	°С	–50
Удельная работа адиабатного сжатия воздуха в компрессоре	$l_{\text{ад}}$	кДж/кг	70,35
Удельная работа политропного сжатия воздуха в компрессоре	$l_{\text{пол}}$	кДж/кг	67,34
Коэффициент рециркуляции	$k_{\text{рец}}$	–	0,31
Мощность, затрачиваемая на привод компрессора при адиабатном сжатии при рециркуляции	$N_{\text{ад}}$	МВт	2,47
Мощность, затрачиваемая на привод компрессора при политропном сжатии при рециркуляции	$N_{\text{пол}}$	МВт	2,57

В табл. 3 представлены характеристики подогрева приемного воздуха при помощи теплообменного аппарата.

Таблица 3

Параметры подогрева приемного воздуха при использовании теплообменного аппарата

Наименование величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Тепловая мощность подогревателя воздуха, подаваемого в компрессор	$N_{\text{п}}$	кВт	1115
Массовый расход греющего теплоносителя	$N_{\text{ГТ}}$	кг/с	15,5
Мощность, необходимая для привода циркуляционного насоса горячего теплоносителя	$N_{\text{ГТ}}$	МВт	3,44

Проведенная оценка энергетических затрат, необходимы для подачи воздуха в противообледенительное устройство составляет для ледоколов пр. 22220 около 2 МВт. Учитывая, что

в состав энергетической установки ледокола указанного проекта входят два паротурбинных агрегата ПТУ-72 суммарной мощностью 72 МВт, эти затраты составляют примерно 2,8 % от мощности СЭУ.

Расчет параметров компрессора ПОУ показал, что при температуре наружного воздуха минус 50 °С, на рециркуляцию необходимо подавать 31 % нагнетаемого воздуха для подогрева наружного воздуха до минус 15 °С. При этом мощность на привод компрессора ТНА возрастает до 2,6 МВт, что составляет 3,6 % мощности СЭУ. Однако в этом случае на сопла подачи воздуха подается только 69 % воздуха от необходимого, что негативно отражается на эффективности противообледенительного устройства, и снижает ледопроходимость ледокола.

Проблему защиты впускного тракта компрессора можно также решить, используя подогреватель воздуха подаваемого в компрессор. Тепловая мощность подогревателя, в соответствии с расчетом, составляет 1115 кВт. Подогрев горячего теплоносителя может быть осуществлен за счет вторичных энергетических ресурсов. При этом обеспечение циркуляции горячего теплоносителя требует дополнительных затрат мощности, которые, в соответствии с выполненным расчетом, составляют 3,44 МВт (около 4,8 % от мощности СЭУ). Тип теплообменного аппарата и его габариты необходимо определять с учетом конструктивных особенностей впускного коллектора компрессора.

Мощность вспомогательных котельных установок линейных ледоколов с дизельными ЭУ составляет от 8000 кВт до 10000 кВт. Дополнительная нагрузка на вспомогательную котельную установку в случае использования ее мощности для обеспечения пневмообдува корпуса ледокола составит 15–18 %, что не окажет существенного негативного влияния на массогабаритные и экономические показатели вспомогательной котельной установки.

При использовании вторичных источников энергии во вспомогательной энергетической установке ледокола дополнительная тепловая нагрузка, необходимая для подогрева подаваемого воздуха в компрессор ПОУ, не потребует использования топлива.

Заключение (Conclusion)

В результате сравнительного анализа способов подогрева воздуха, поступающего в компрессор, было выявлено следующее:

- наименее энергетически выгодным является подогрев приемного воздуха компрессора противообледенительного устройства с использованием исключительно теплообменного аппарата. Этот способ подогрева воздуха требует наиболее существенной конструктивной модернизации ПОУ и наибольших относительных затрат мощности на его осуществление;
- при подогреве подаваемого воздуха за счет рециркуляции воздуха, в случае ее максимального использования, энергопотребление ПОУ снижается на 40 %, однако при этом к соплам будет поступать только 69 % воздуха, подаваемого компрессором;
- наиболее предпочтительным с энергетической точки зрения является комплексное использование рециркуляции нагнетаемого компрессором воздуха и его подогрева в теплообменном аппарате для достижения требуемой температуры воздуха на входе в компрессор.

Поскольку уменьшение воздуха, подаваемого к выпускным соплам, влечет за собой снижение эффективности пневмообмыва и ухудшает ледопроходимость ледокола, наиболее оптимальным способом подогрева воздуха является совместное использование рециркуляции и подогревателя, расположенного в шахте приема воздуха. Использование вторичных источников энергии для воздухоподогревателя не будет снижать энергетическую эффективность вспомогательной котельной установки ледокола.

При выборе температуры перед компрессором необходимо учитывать, что ее повышение приводит к снижению эффективности нагнетателя [16]. Выбор наиболее рациональных температурных режимов работы компрессора ПОУ и распределение теплоподвода к воздуху между рециркуляцией и теплообменным аппаратом требуют продолжения исследований с применением методов многофакторной оптимизации. Перспективным направлением совершенствования противообледенительных систем с целью повышения их энергоэффективности является разработка алгоритма

управления режимами пневмообдува в зависимости от условий эксплуатации и автоматизация процесса управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 29.02.2016 № 327-р «О Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/22004/> (дата обращения: 15.02.2023).
2. Распоряжение Правительства РФ от 28.10.2019 № 2553-р «Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/38218/> (дата обращения: 15.02.2023).
3. Александров М. А. Перспективы атомного ледокольного флота по освоению Северного морского пути / М. А. Александров, Ю. Л. Бордученко // Морской вестник. — 2021. — № 2 (78). — С. 17–23.
4. Бордученко Ю. Л. Атомный ледокольный флот России в начале XXI века. Задачи и перспективы / Ю. Л. Бордученко // Энергия: экономика, техника, экология. — 2020. — № 7. — С. 26–33. DOI: 10.7868/S0233361920070046.
5. Бордученко Ю. Л. Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути / Ю. Л. Бордученко, И. Г. Малыгин, В. Ю. Каминский, В. А. Аксенов // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2–1 (52). — С. 14–25. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.001.
6. Пустошный А. В. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике / А. В. Пустошный, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
7. Сазонов К. Е. Развитие ледовой ходкости судов в XXI веке / К. Е. Сазонов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 2(384). — С. 9–28. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9–28.
8. Калинина Н. В. Влияние пневмоомывающего устройства на ходкость ледоколов / Н. В. Калинина // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1. — С. 308.
9. Reducing ice friction since 1969 // Arctic Passion News, Aker Arctic Technology Inc's customer magazine. — 2020. — Vol. 1. — Is. 19. — Pp. 18–19.
10. Жуков В. А. Противообледенительное устройство ледокола как средство повышения энергоэффективности судна / В. А. Жуков, Е. А. Степанов, В. Л. Ерофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 430–439. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-430-439.
11. Жуков В. А. Определение энергопотребления противообледенительных устройств ледоколов / В. А. Жуков, Е. А. Степанов // Морские технологии: проблемы и решения — 2022: сб. ст. участников науч.-практ. конф. — Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. — С. 33–35.
12. Лобода Б. Н. Компактные судовые компрессорные установки двойного применения / Б. Н. Лобода [и др.] // Судостроение. — 2006. — № 3 (766). — С. 40–42.
13. Кузнецов Л. Г. Применение роторных компрессорных систем АО «Компрессор» для эффективного решения задач пневмоомыва корпуса ледокола и в альтернативных гражданских проектах / Л. Г. Кузнецов [и др.] // Морской вестник. — 2018. — № 2 (66). — С. 41–44.
14. Пинчук О. А. Некоторые свойства хладоносителей на основе водного раствора пропиленгликоля / О. А. Пинчук, С. В. Караван, Д. В. Караван // Холодильная техника. — 2009. — № 6. — С. 26–29.
15. Ерофеев В. Л. Теплотехника: учебник для вузов / В. Л. Ерофеев, П. Д. Семенов, А. С. Пряхин. — М.: Академкнига, 2008. — 488 с.
16. Хатамова Д. Н. Исследование влияния температуры всасываемого воздуха на эффективность поршневого компрессора / Д. Н. Хатамова, Р. У. Джураев // Universum: технические науки. — 2021. — № 6–2 (87). — С. 44–47. DOI: 10.32743/UniTech.2021.87.6.12008.

REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29.02.2016 № 327-r «O Strategii razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda». Web. 15 Feb. 2023 <<http://government.ru/docs/22004/>>.

2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28.10.2019 № 2553-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya sudostroitel'noi promyshlennosti na period do 2035 goda». Web. 15 Feb. 2023 <<http://government.ru/docs/38218/>>.
3. Aleksandrov, M.A., and Yu. L. Borduchenko. "Perspektivy atomnogo ledokol'nogo flota po osvoeniyu Severnogo morskogo puti." *Morskoi vestnik* 2(78) (2021): 17–23.
4. Borduchenko, Yu.L. "Atomnyi ledokol'nyi flot Rossii v nachale XXI veka. Zadachi i perspektivy." *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* 7 (2020): 26–33. DOI: 10.7868/S0233361920070046.
5. Borduchenko, Yuri L., Igor G. Malygin, Valery Yu. Kaminsky, and Vladimir A. Aksenov. "The nuclear icebreaker fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. Challenges and prospects for the development of the northern sea route." *Marine intellectual technologies* 2–1(52) (2021): 14–25. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.001.
6. Pustoshny, Alexander V., and Kirill E. Sazonov. "Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round arctic operations." *Arctic: Ecology and Economics* 3(27) (2017): 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
7. Sazonov, Kirill Ye. "Ship ice propulsion performance developments in the XXIst century." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 2(384) (2018): 9–28.
8. Kalinina, N.V. "Influence of pneumatic-washed device on icebreakers propulsion." *Modern problems of science and education* 1–1 (2015): 308.
9. "Reducing ice friction since 1969." *Arctic Passion News, Aker Arctic Technology Inc's customer magazine* 1.19 (2020): 18–19.
10. Zhukov, Vladimir A., Evgenij A. Stepanov, and Valentin L. Erofeev. "Anti-icing device of an icebreaker as a means of increasing the ship energy efficiency." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 430–439. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-430-439.
11. Zhukov, V. A., and E. A. Stepanov. "Opredelenie energopotrebleniya protivooledenitel'nykh ustroystv ledokolov." *Morskie tekhnologii: problemy i resheniya — 2022: Sbornik statei uchastnikov nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kerch': FGBOU VO «Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet», 2022. 33–35.
12. Loboda, B. N., L. V. Belov, A. N. Kaverzniev, A. I. Gitelman, I. N. Khasov, V. V. Ogniev, V. G. Pildish, and V. I. Solonin. "Compact turbine-compressor plants of dual use." *Shipbuilding* 3(766) (2006): 40–42.
13. Kuznetsov, L. G., Yu. L. Kuznetsov, A. V. Burakov, and N. A. Kotlov. "Primenenie rotornykh kompressornykh sistem AO "Kompressor" dlya effektivnogo resheniya zadach pnevmoobmyva korpusa ledokola i v al'ternativnykh grazhdanskikh proektakh." *Morskoi vestnik* 2(66) (2018): 41–44.
14. Pinchuk, O. A., S. V. Karavan, and D. V. Karavan. "Nekotorye svoystva khladonositeley na osnove vodnogo rastvora propilenglikolya." *Kholodil'naya tekhnika* 6 (2009): 26–29.
15. Erofeev, V. L., P. D. Semenov, and A. S. Pryakhin. *Teplotekhnika. Uchebnik dlya vuzov*. M.: Akademkniga, 2008.
16. Khatamova, Dilshoda, and Rustam Dzhuraev. "Investigation of the influence of the intake air temperature on the efficiency of a reciprocating compressor." *Universum* 6–2(87) (2021): 44–47. DOI: 10.32743/Uni-Tech.2021.87.6.12008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир 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: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Степанов Евгений Андреевич — аспирант
Научный руководитель:
Жуков Владимир Анатольевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov, Vladimir 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: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Stepanov, Evgenij A. — Postgraduate
Supervisor:
Zhukov, Vladimir A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

Ерофеев Валентин 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: kaf_sdvs@gumrf.ru

Erofeev, Valentin 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: kaf_sdvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 7 марта 2023 г.

Received: March 7, 2023.

BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS FOR MARINE ELECTRIC DRIVE SYSTEMS: STATE AND PROSPECTS

V. E. Vysotsky

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The main trends in the development of designs, power semiconductor circuits and control systems of promising valve electromechanical converters — brushless DC motors with permanent magnets for marine electric drive and automation equipment, are discussed in the paper. A variant of their implementation in an adjustable electric drive is presented. The object of the study is a brushless direct current electromechanical system, including a synchronous machine with magnetoelectric excitation, covered by positional feedback through a dependent controlled valve switch, and the subject is structures, the circuit of the power part, control systems, the algorithm of functioning and characteristics. The purpose of the research is to evaluate the operational features, properties and possibilities of introducing brushless direct current motors with permanent magnets as marine electric drive systems of low and medium power. The results of research and development are embodied in experimental industrial samples. A variant with microprocessor control has been developed for marine electric drive systems. The switch is assembled on transistor switches that provide high reliability and enhance the functionality of the control system. The minimum necessary system of logical variables, ensuring the implementation of rational laws of switching and speed control, has been formed. Operational characteristics at various leading angles of switching on the switch valves are presented. The presence of pole shoes at the poles introduces significant features in the patterns of their change. The main advantages and features of the proposed design and circuit solutions are formulated in the conclusions. It is indicated that valve motors with excitation from permanent magnets are the most promising solution in terms of integrating an electromechanical converter into an adjustable marine electric drive of a range of small and medium capacities. Engines of this type are structurally simple and reliable, have rigid natural mechanical characteristics, do not require energy for excitation, have a large overload capacity and high speed in transients. Their distinctive feature is the high specific moment.

Keywords: brushless DC motor, magnets, rotor “asterisk”, switchboard, positional control, microcontroller, algorithm, characteristics, regulation.

For citation:

Vysotsky, Vitaly E. “Brushless direct current motors with permanent magnets for marine electric drive systems: state and prospects.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 476–489. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-476-489.

УДК 621.313.333.077.03

ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СИСТЕМАХ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. Е. Высоцкий

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

В статье рассматриваются основные тенденции развития конструкций, силовых полупроводниковых схем и систем управления перспективных вентильных электромеханических преобразователей — вентильных двигателей с постоянными магнитами для судового электропривода и средств автоматики. Представлен вариант их реализации в регулируемом электроприводе. Объектом исследования является вентильная электро-механическая система, включающая синхронную машину с магнитоэлектрическим возбуждением, охваченную позиционной обратной связью через зависимый управляемый вентильный коммутатор, предметом — конструкции, схема силовой части, системы управления, алгоритм функционирования и характеристики. Целью исследований является оценка эксплуатационных особенностей, свойств и возможностей внедрения вентильных двигателей с постоянными магнитами в качестве судовых электроприводных систем малой и средней мощности. Результаты исследований и разработок воплощены в опытно-промышленных образцах.

Для систем судового электропривода разработан вариант с микропроцессорным управлением. Коммутатор собран на транзисторных ключах, обеспечивающих высокую надежность и повышающих функциональные возможности системы управления. Сформирована минимально необходимая система логических переменных, обеспечивающая реализацию рациональных законов коммутации и регулирования частоты вращения. Представлены эксплуатационные характеристики при различных опережающих углах включения вентилей коммутатора. Наличие полюсных бабмаков на полюсах вносит существенные особенности в закономерности их изменения. В выводах сформулированы основные преимущества и особенности предложенных в работе конструктивных и схемных решений. Отмечается, что вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов являются наиболее перспективными в плане интеграции электромеханического преобразователя в регулируемый судовый электропривод диапазона малых и средних мощностей. Двигатели такого типа конструктивно просты и надежны, имеют жесткие естественные механические характеристики, не требуют затрат энергии на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах, их отличительной особенностью является высокий удельный момент.

Ключевые слова: вентильный двигатель, магниты, ротор «звездочка», коммутатор, позиционное управление, микроконтроллер, алгоритм, характеристики, регулирование.

Для цитирования:

Высоцкий В. Е. Вентильные двигатели с постоянными магнитами в системах судового электропривода: состояние и перспективы / В. Е. Высоцкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 476–489. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-476-489.

Введение (Introduction)

Вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ) как органичное объединение бесколлекторного электромеханического и позиционно управляемого вентильного преобразователей развивались прежде всего для электропривода в машиностроении и систем промышленной автоматики, однако они оказались востребованными и в корабельном электрооборудовании. Проведение обобщенных экспертных оценок (табл. 1) корабельных электроприводов [1] позволило выявить преимущество вентильно-индукторных двигателей (ВИД) и ВДПМ по сравнению с двигателями постоянного тока (ДПТ) и асинхронными двигателями (АД), причем в отношении показателей качества электромеханического преобразования энергии: пульсаций частоты вращения и момента, они имеют преимущество.

Таблица 1

Экспертная оценка качества электроприводов с различными типами двигателей

Элементы электромеханической системы	ДПТ	АД	ВДПМ	ВИД
Конструкция двигателя	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая
Управляемый вентильный преобразователь	Высокая	Низкая	Низкая	Средняя
Система управления	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя
Динамика	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Стоимость	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
Тепловое состояние ротора	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая
Регулирование ослаблением поля	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая
Пульсации частоты вращения и момента	Высокая	Средняя	Высокая	Низкая
Электромагнитная совместимость	Высокая	Низкая	Высокая	Средняя
Эксплуатационные качества	Низкая	Высокая	Средняя	Высокая
Надежность	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая

Заниженные оценки ВДПМ обусловлены высокой стоимостью редкоземельных постоянных магнитов (РЗМ) и технологическими трудностями их изготовления. В отношении конструкции, связанной с наличием датчика положения ротора, следует отметить развитие в течение последних 10–15 лет ведущими производителями комплектных электроприводов с вентильными двигателями, так называемых *бездатчиковых систем*, когда идентификация положения ротора заменяется управлением по полю и обобщенному вектору напряжения [2], что позволяет существенно повысить надежность и отказоустойчивость таких управляемых вентильных электромеханических комплексов.

Анализ достижений в этой области электромеханики показал, что во ВНИПТИЭМ (г. Владимир) разработана и освоена серия вентильных двигателей V/D мощностью 0,5–20 кВт, изготавливаемых на базе синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) со встроенными датчиками положения ротора, скорости и тормозом [3]. С начала 2000-х гг. во ВНИИР (г. Чебоксары) разработан и налажен промышленный выпуск новой серии вентильных двигателей 5ДВМ с возбуждением от постоянных магнитов с улучшенными весогабаритными и эксплуатационными характеристиками [4]. В ОАО «Электропривод» (г. Киров) освоены в производстве ВДПМ со встроенными датчиками положения ротора, тахометрическими датчиками и магнитоэлектрическими тормозами для исполнительных механизмов универсальных технологических роботов и другого прецизионного металлообрабатывающего оборудования. Многополюсная сборная магнитная система ВДПМ серии ДВМ выполнена на постоянных магнитах Nd-Fe-B, пределы максимальных частот вращения которых составляют: 2000–6000 об/мин для ДВМ72–1–1,6; 1000–3000 об/мин для ДВМ115–ДВМ142; 3000 об/мин — для ДВМ192, а диапазоны моментов, соответственно, 0–1,1 Н·м; 0–18 Н·м; 0,2–36 Н·м. При этом диапазон мощности составляет 0,69–11,3 кВт [5]. Работы по оптимизации динамических, энергетических и массогабаритных показателей продолжаются на ОАО «Лепсе» (г. Киров) [6].

Двигатели с индуктором на РЗМ имеют следующие преимущества: повышение удельных показателей активных частей более чем в 3–3,5 раза, двигателя в целом — более чем в 2 раза; существенное увеличение устойчивости против размагничивающего действия реакции якоря; увеличение быстродействия за счет уменьшения момента инерции ротора почти в 5–6 раз. Кроме того, по удельному моменту ВДПМ нет равных среди других двигателей. Максимальная сила, снимаемая с единицы поверхности расточки статора, достигает 10 Н·м/см². Увеличение удельных показателей ВДПМ возможно не только за счет повышения энергии ПМ, но и концентрации магнитного потока [7], [8].

Стоимость ПМ составляет более 30 % стоимости ВДПМ, поэтому вопросы их оптимального использования по массе и объему имеют решающее значение. Поиск рациональных конструктивных решений по роторам и возможностей их эффективного использования в ВДПМ малой и средней мощности продолжается до настоящего времени [9]–[12]. Указанные тенденции можно спроецировать также на системы судового электропривода и автоматики. Наиболее перспективными областями применения ВДПМ являются авторулевые комплексы и подруливающие устройства, антенные и навигационные системы, вспомогательные судовые электроприводы.

Целью исследований является оценка эксплуатационных особенностей, свойств, а также возможностей внедрения ВДПМ в судовых системах электропривода и автоматики малой и средней мощности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для ВДПМ данного исследования были разработаны и оптимизированы по массогабаритам два перспективных типагабарита конструкции ВДПМ. Один из них — ВДПМ с ротором типа «звездочка» без полюсных башмаков — ВДПМ-1 (рис. 1 и 2) — относится к первой группе магнитных систем.

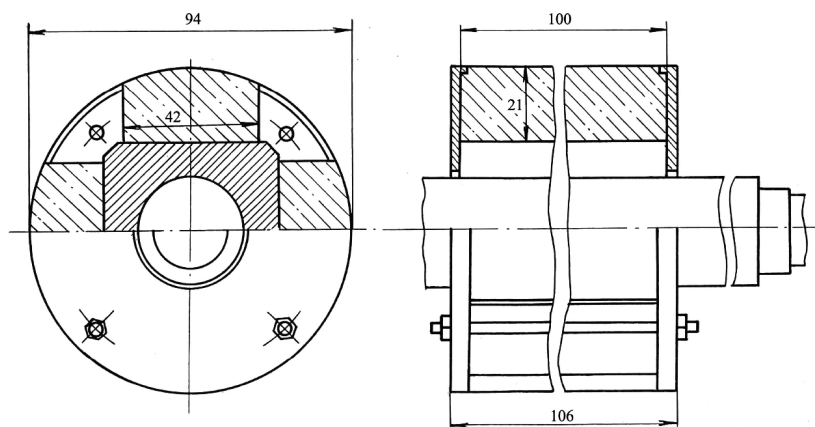


Рис. 1. Конструкция ротора ВД типа «звездочка» без полюсных башмаков

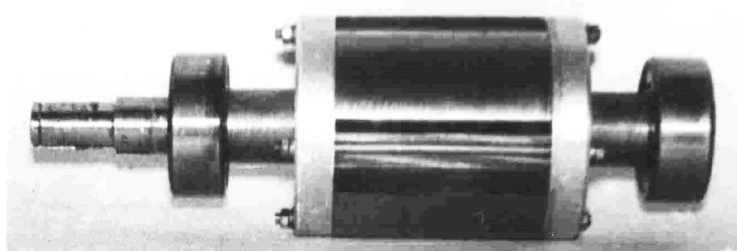


Рис. 2. Ротор опытного образца ВДПМ-1

Ротор другого типогабарита ВДПМ-2 относится ко *второй группе* магнитных систем — ротору типа «звездочка» с полюсными наконечниками (рис. 3 и 4).

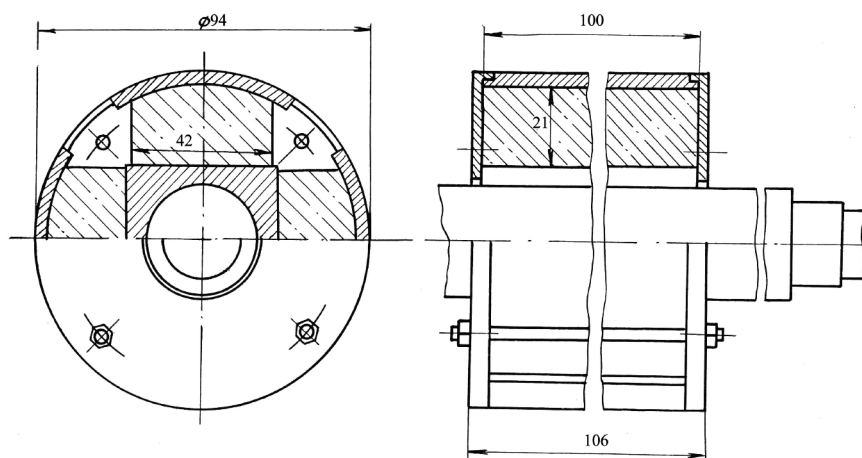


Рис. 3. Конструкция ротора ВД типа «звездочка» с полюсными башмаками

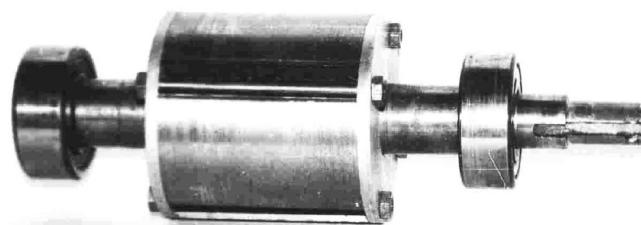


Рис. 4. Ротор опытного образца ВДПМ-2

В конструкции индуктора, как в первом, так и втором случае, использованы магниты ЮНДК35Т5БА. В перспективе предполагается использовать магниты из сплава Nd-Fe-B, что позволит улучшить удельные массогабаритные показатели. Причем конструктивные параметры роторов были выбраны таким образом, что первый и второй образцы имеют одинаковые габаритно-присоединительные размеры, высоты, объемы магнитов, а следовательно, равные по величине моменты инерции (табл. 2).

Таблица 2

Основные технические данные опытных образцов ВДПМ

Параметр	P_n , кВт	Напряжение на входе УВК U_a , В	Ток на входе УВК I_a , А	n , об/мин	m	$2p$	η , о.е.	r_{ϕ} , Ом	L_q/L_d	α_p
ВДПМ-1	1,2	300	5,4	1500	3	4	0,74	0,92	1	0,59
ВДПМ-2	1,16	300	5,4	1500	3	4	0,72	0,92	2,15	0,75

Данный подход позволил провести испытание с одним статором и выявить влияние именно конструктивных особенностей и электромагнитных параметров на закономерности изменения характеристики ВДПМ-1 и ВДПМ-2 в установившихся и переходных режимах. Для систем судового электропривода специального назначения разработан ВДПМ с микропроцессорным управлением. Система управления обеспечивает создание системы периодических фазных напряжений U_a , U_b , U_c , сдвинутых относительно друг друга на угол $2\pi/3$, пуск, регулирование частоты вращения, реверсирование и торможение двигателя, а также защиту в аварийных режимах.

Датчики положения ротора (ДПР) расположены на специальном кронштейне (траверсе), укрепленном на подшипниковом щите. В качестве ДПР использованы датчики Холла стандартного интегрального исполнения, широко применяемые в системах электронной автоматики и электрооборудования автомобилей. Магнитоуправляемая интегральная микросхема конструктивно и технологически выполнена таким образом, что включает основной элемент — датчик Холла (ДХ) и преобразовательную схему с усилителем $У$, пороговым элементом ST , выходным каскадом VT и стабилизатором напряжения $СТ$ (рис. 5). Путем изменения индукции магнитного поля от 0 до B_{max} с помощью магнитного экрана (сигнального диска) на выходе магнитоуправляемой интегральной микросхемы датчиков (ДПР1–ДПР3) обеспечивается дискретный управляющий сигнал, для усиления которого используются усилители сигналов датчиков, расположенные конструктивно в блоке системы управления вентильным коммутатором (УВК).

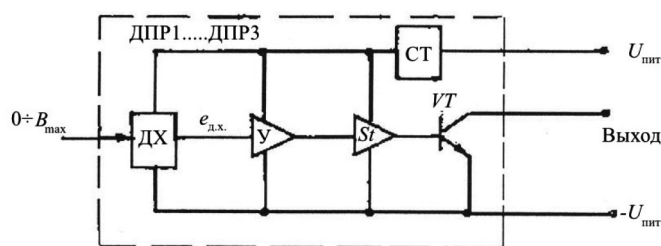


Рис. 5. Датчик положения ротора

Сигнальный сектор, находящийся на роторе и жестко связанный с валом электромеханического преобразователя ВДПМ, выполнен из магнитопроводящего материала (сталь 30ХГСА) и содержит число сигнальных элементов, равное числу пар полюсов, т. е. в данном случае равное двум ($2p = 4$).

Для формирования импульсов управления длительность импульсов с ДПР1–ДПР3 должна составлять 180 эл. град., поэтому угловой размер сегмента составляет 90°. При нахождении сигнальных секторов (сегментов) в зазоре между магнитоуправляемой схемой и магнитом происходит периодическое шунтирование магнитного потока, и на выходе ДПР формируется сигнал об угловом положении ротора, при этом фронт сигнала практически не зависит от частоты вращения сегментов.

Усиленные сигналы с датчиков, подаваемые на входы порта микроконтроллера (три канала захвата-сравнения), используются для формирования сигналов позиционной коммутации (рис. 6). Для управления ВДПМ использован микроконтроллер MC8 × C196MD (МК), функции которого программируются пользователем. Наличие встроенного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) позволяет вводить в систему управления сигналы обратных связей с аналоговых датчиков тока (ДТ), напряжения (ДН) и в случае необходимости температуры. В качестве входной информации МК используются сигналы, подаваемые на четыре схемы захвата, одна из которых необходима для работы УИПТ с целью синхронизации с напряжением сети, а три других — для синхронизации с положением ротора. Встроенный АЦП используется для приема информации о требуемом угле опережения (запаздывания) включения вентилей УВК β_0 и требуемом напряжении $U_{пит}$ на входе коммутатора. Напряжение задания для создания задержки импульсов управления (регулирования угла) поступает на один из входов АЦП. Кроме того, задействованы два цифровых порта, один из них принимает информацию о направлении вращения, другой — информацию об останове ВДПМ.

Управляющие воздействия с МК через восемь каналов подаются на устройства управления — драйверы (УД) управляемого источника постоянного тока (УИПТ) и УВК. По двум каналам осуществляется управление УИПТ, по шести — управление ключами УВК. В частности, сигналы управления с порта управления МК подаются на вход УВК через УД. Блоки драйверов показаны на рис. 6. Драйверы представляют собой предвыходные каскады, собранные на таймерах КР106ВИ1, к которым подается двухполярное питание. Их входы электрически развязаны с блоками системы управления благодаря применению оптронной схемы на транзисторе, представляющем собой комбинацию светодиод-фототранзистор. Выход каждого таймера КР106ВИ1 соединен с двухтактным усилителем-повторителем.

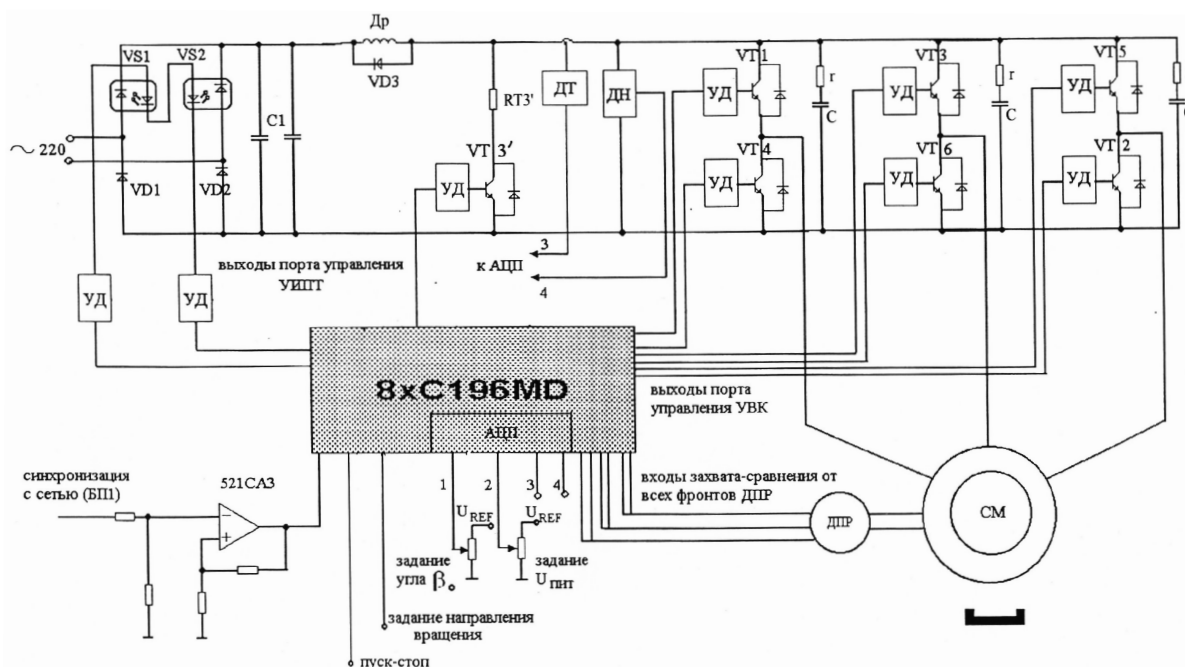


Рис. 6. Схема формирования сигналов позиционной коммутации

Коммутатор собран на транзисторных ключах, обеспечивающих высокую надежность и повышающих функциональные возможности системы управления ВДПМ. УВК или инвертор представляет собой трехфазную мостовую схему (см. рис. 6), собранную на шести интегральных транзисторных модулях $VT1-VT6$ типа МТКД-40–7. Применяемые модули, выполненные по дарлингтоновским схемам со встроенным диодом обратного моста, имеют большой коэффициент усиления ($K_y \leq 50$). Это позволяет упростить схему предварительного усиления. Для надежного включения таких транзисторов базовый ток, который должен составлять порядка 0,7–1,0 А, поступает через один из транзисторов оконечного каскада драйвера. В режиме «отсечки» на базы $VT1-VT6$ подается отрицательный потенциал –5 В для надежного их запираения через другой транзистор каскада (см. рис. 6).

Однофазный полууправляемый мостовой выпрямитель (УИПТ) собран на силовых диодах $VD1$, $VD2$ и оптронных тиристорах $VS1$ и $VS2$, управляемых через драйверы УД от МК в соответствии с сигналом синхронизации от сети (блока питания БП1) — через каскад 521CA3. При включении двигателя напряжение на выходе УИПТ плавно увеличивается, обеспечивая при этом необходимый пусковой ток и момент для разгона двигателя. В аварийных режимах и при КЗ в двигателе или УВК сигнал с датчика тока (ДТ) включает через драйвер ключ $VT3'$, шунтируя питание УВК, благодаря чему ток КЗ не допускает опасных для транзисторов величин. Для ограничения скорости нарастания тока применен воздушный дроссель Др., зашунтированный диодом $VD3$. Одновременно с включением $VT3'$ снимаются управляющие сигналы с $VS1$, $VS2$ и напряжение на выходе УИПТ уменьшается до нуля за время, соответствующее постоянной времени разряда конденсатора $C1$.

Результаты (Results)

Сформирована минимально необходимая система логических переменных, обеспечивающая реализацию рациональных законов коммутации, использованы основные соотношения, лежащие в основе микропроцессорного управления ВДПМ при регулировании частоты вращения за счет изменения напряжения на входе УИПТ. Минимально необходимое число логических переменных, которое может обеспечить управление ВДПМ, равно пяти: две переменные для управления направлением вращения и синхронизации с сетью и три переменные для формирования сигналов, сдвинутых между собой на угол $2\pi/3$.

Направление вращения двигателя определяется полярностью напряжения, прикладываемого к обмотке якоря (ОЯ), и зависит от знака кода управления. Среднее значение частоты вращения двигателя при питании от УИПТ определяется временным интервалом, в течение которого на одном полупериоде напряжения сети либо прикладывается напряжение к ОЯ, либо осуществляется динамическое торможение.

При использовании датчиков Холла для оценки положения ротора двигателя сигналы с датчиков положения ротора вводятся в микроконтроллер на входы модулей захвата процессоров событий (порт 2). Обработка двигателем каждого целого шага идентифицируется процессором событий (ЕРА). Прерывание, возникающее на каждом захвате фронта сигнала с датчика, используется для оценки времени между двумя соседними переключениями.

В качестве главных входных сигналов для оперативного управления ВДПМ используются: ток на входе УВК, напряжение звена постоянного тока, сигналы, управляющие углом опережения (запаздывания) включения вентилей УВК β_0 и напряжением на входе УВК. Все эти сигналы принимаются через модуль аналого-цифрового преобразователя АЦП (каналы 1–4 на рис. 6).

Идентификация начального состояния датчиков положения и ключей УВК, осуществляемая путем чтения кодов состояния ДПР, кода направления вращения, определяется из таблицы состояния ключей [13], а затем выдается на схемы в виде кода состояния. Программное обеспечение состоит из основной программы (рис. 7), подпрограммы обработки прерываний от захвата фронта сигнала синхронизации с сетью (рис. 8, а), подпрограммы обработки прерываний от таймера $T1$ (рис. 8, б) подпрограммы обработки прерываний от захвата фронтов датчиков положения ротора (рис. 8, в), подпрограммы обработки прерываний от таймера $T2$ (рис. 8, г).

Основная программа предназначена для инициализации встроенных в микроконтроллер внешних устройств, таких как АЦП, цифровых портов, схем захвата фронтов сигнала, таймеров, а также для настройки всех прерываний. Большой цикл завершается проверкой необходимости останова ВДПМ. Если такой останов необходим, то осуществляется запрет всех прерываний и перевод всех выходов, управляющих силовым вентильным блоком (УИПТ и УВК), в неактивное состояние. Соответствующие ключи при этом закрываются.

Подпрограммы обработки прерываний по своему функциональному назначению разделены на два блока. Первый блок подпрограмм используется для управления УИПТ, второй — для управления УВК. Синхронизация с сетью осуществляется подпрограммой обработки прерываний, вызываемой фронтом сигнала от сформированных сетевых импульсов, выполняющей следующие функции:

- загрузка в таймер $T1$ кода длительности, пропорционального необходимой задержке для обеспечения заданного напряжения в звене постоянного тока ($U_{\text{пнт}}$);
- запуск таймера $T1$, который при своем переполнении будет вызывать соответствующее прерывание;
- перенастройка схемы захвата на захват противоположного фронта;
- установка номера активного ключа;
- разрешение на выход из этой подпрограммы, прерывание от таймера.

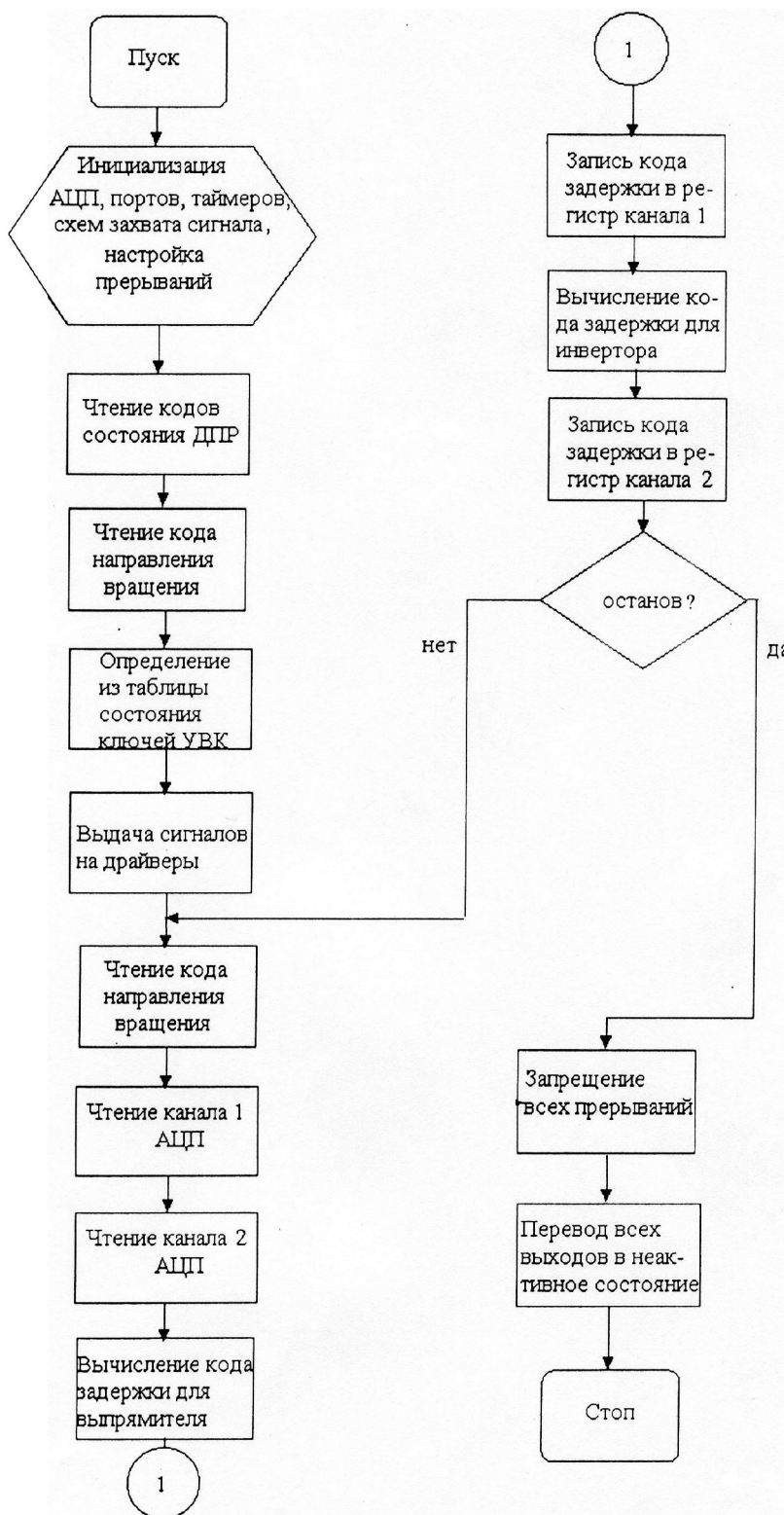


Рис. 7. Алгоритм управления микроконтроллером

Вторая подпрограмма из этого блока, вызываемая переполнением таймера $T1$, служит для выдачи управляющего сигнала на требуемый ключ УИПТ и по выходу запрещает прерывание от таймера $T1$. Таким образом, первый блок программ обеспечивает выдачу импульса на ключи УИПТ в соответствии с требуемым напряжением на выходе. Второй блок подпрограмм служит для управления УВК.

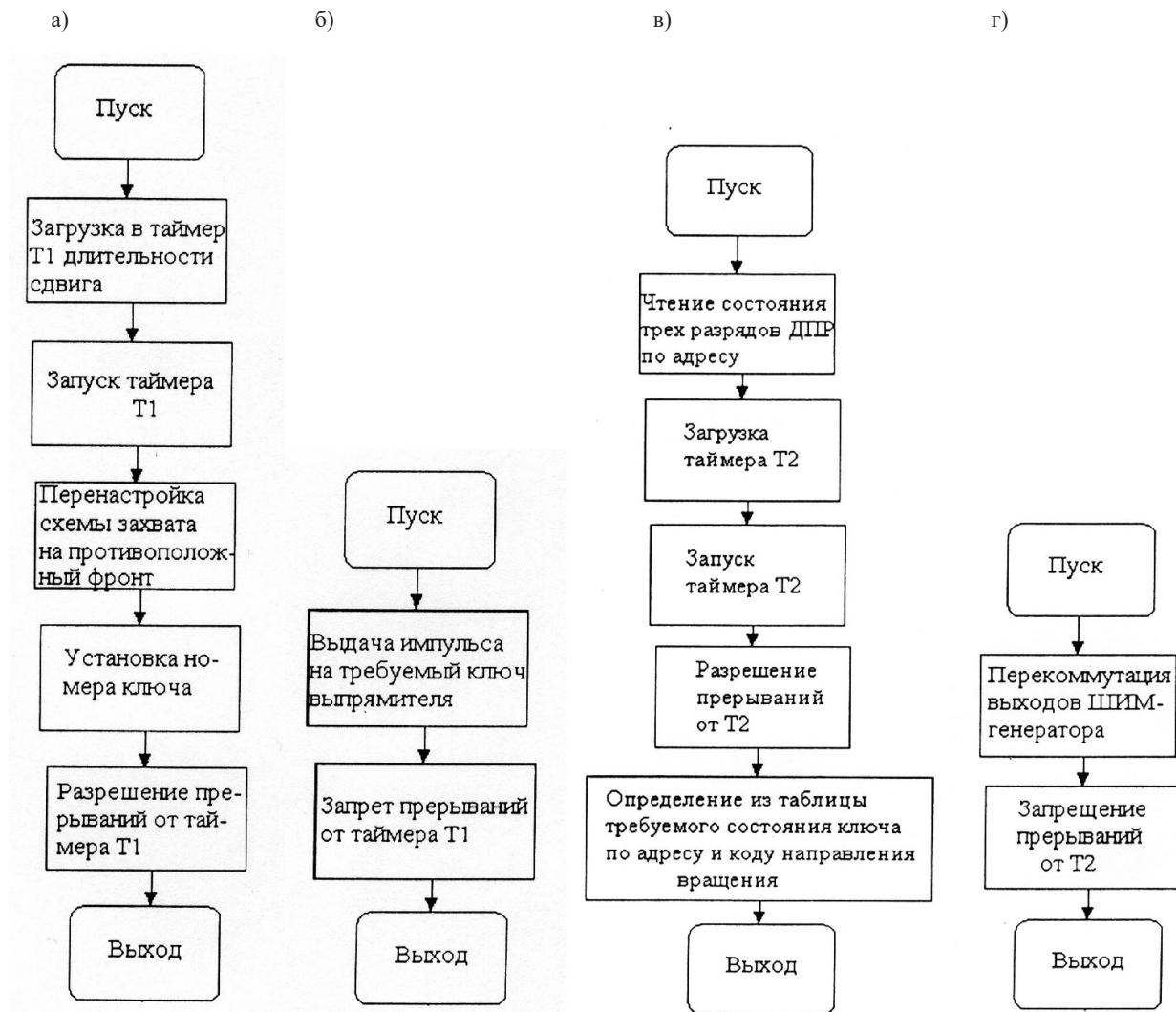


Рис. 8. Алгоритмы работы подпрограмм, вызываемых фронтом от сети для УИПТ (а) и переключением таймера $T1$ (б), прерывания захвата обоих фронтов ДПР (в) и обработки прерываний от таймера $T2$ (г)

Внешние временные события определяются сигналами ДПР (три временных последовательности импульсов длительностью 180 эл. град., сдвинутых друг относительно друга на 120 эл. град.). Каждый фронт-спад захватывается схемами захвата EPA (процессорами событий), при этом вызываются подпрограммы обработки прерываний от указанных фронтов.

Для правильного включения ключей УВК, на основании ранее прочитанного состояния ДПР с использованием таблиц, осуществляется определение требуемого состояния ключей на данном такте работы УВК. Каждому направлению вращения соответствует своя таблица. После того как таймер отсчитает требуемое время задержки, соответствующее углу опережения (запаздывания) включения вентилей УВК β_0 , вызывается подпрограмма обработки прерываний от $T2$, осуществляющая непосредственную выдачу на драйверы сигналов для включения-отключения ключей УВК. Перед окончанием работы подпрограммой осуществляется запрещение прерываний от $T2$ и возврат в основную программу.

При превышении тока инвертора (УВК) некоторого заданного значения осуществляется аппаратный вызов прерывания от АЦП (именно АЦП осуществляет измерение тока), и процессор переходит на программу обработки прерывания, задачей которой является определение степени сложности аварийной ситуации. В зависимости от этого либо осуществляется аварийное отключение инвертора, либо уменьшается напряжение УИПТ для снижения тока.

Для обеспечения защиты используется режим АЦП, при котором осуществляется прерывание при превышении сигналом заранее заданного уровня, равного 2,5 В, соответствующего току, при котором необходимо отключение ВДПМ, причем сигналы задания, пропорциональные углу β_0 и частоте вращения (или $U_{\text{пит}}$), должны сохраняться как в обычном режиме. Для этого в момент времени t_b , когда нужно читать эти сигналы, в подпрограмму следует добавлять команды перенастройки АЦП в штатный режим, а после преобразования добавлять команды, возвращающие АЦП в режим превышения сигнала. Таким образом, АЦП постоянно находится в режиме превышения сигнала, кроме моментов времени, когда необходимо чтение информации об угле опережения (запаздывания) β_0 или уровне напряжения питания $U_{\text{пит}}$.

Обсуждение (Discussion)

Для ВДПМ-1 величина индуктивного сопротивления не зависит от угла поворота — в любом положении ротора выполняется соотношение $L_q/L_d = 1$. Для образца ВДПМ-2 значение поперечной индуктивности $L_q = 13 \cdot 10^{-3}$ Гн, тогда как значение продольной индуктивности гораздо меньше — $L_d = 6 \cdot 10^{-3}$ Гн. Очевидно, что в последнем случае значительная часть поперечного потока замыкается через воздушный зазор и полюсные башмаки. Закон изменения индуктивности якорной обмотки близок к трапецеидальному, но при этом она изменяется с двойной частотой относительно угла поворота ротора. На рис. 9 приведены характеристики для ВДПМ — 1, на рис. 10 — для ВДПМ-2 при опережающих углах включения вентилей $\beta_0 = -10$ эл. град. Наличие полюсных башмаков вносит некоторые особенности в закономерности изменения рабочих характеристик, приводя к возрастанию индуктивного сопротивления рассеяния X_s и появлению дополнительного потока рассеяния Φ_s .

Изменение индуктивности якорной обмотки на интервале повторяемости влечет за собой ухудшение гармонического состава тока и, как следствие, увеличение потерь в машине. Все это приводит к некоторому снижению КПД и полезной мощности P_2 на валу у образца ВДПМ-2. В то же время увеличение X_s ведет к снижению тока КЗ. В этом случае полюсные наконечники выполняют функцию демпфера потока КЗ, предохраняя магниты от размагничивания. Вследствие появления дополнительных потоков рассеяния и пульсаций тока двигателя за счет изменения индуктивности якорной обмотки момент, развиваемый образцом ВДПМ-2, оказывается несколько меньше, чем у ВДПМ-1 (рис. 9).

Пунктирными линиями показаны характеристики, рассчитанные с использованием аппроксимации закона распределения индукции в воздушном зазоре. Электромагнитный момент ВДПМ определен по выражению для трех гармонических составляющих пространственного распределения магнитного поля.

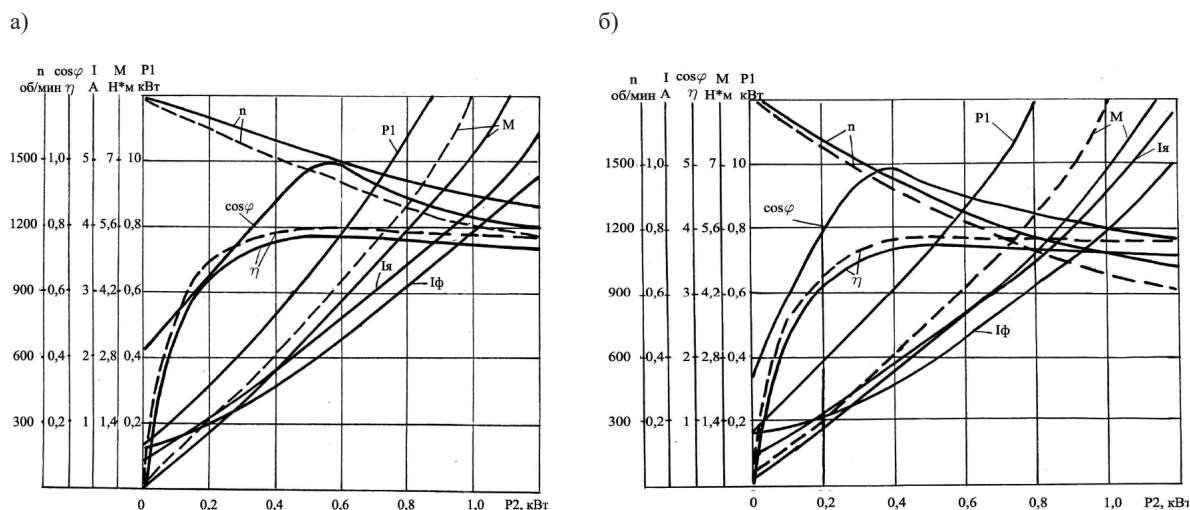


Рис. 9. Рабочие характеристики опытных образцов ВДПМ-1 (а) и ВДПМ-2 (б) при $\beta_0 = -10$ эл. град.

Следует отметить, что выполненное ранее сравнение образцов по P_2 и M справедливо лишь в том случае, если ротор намагничен в статоре машины либо магниты стабилизированы до одинакового состояния, что может осуществляться различными по величине токами КЗ. В другом состоянии образец ВДПМ-2 (рис. 10) развивает несколько большую полезную мощность на валу и момент M .

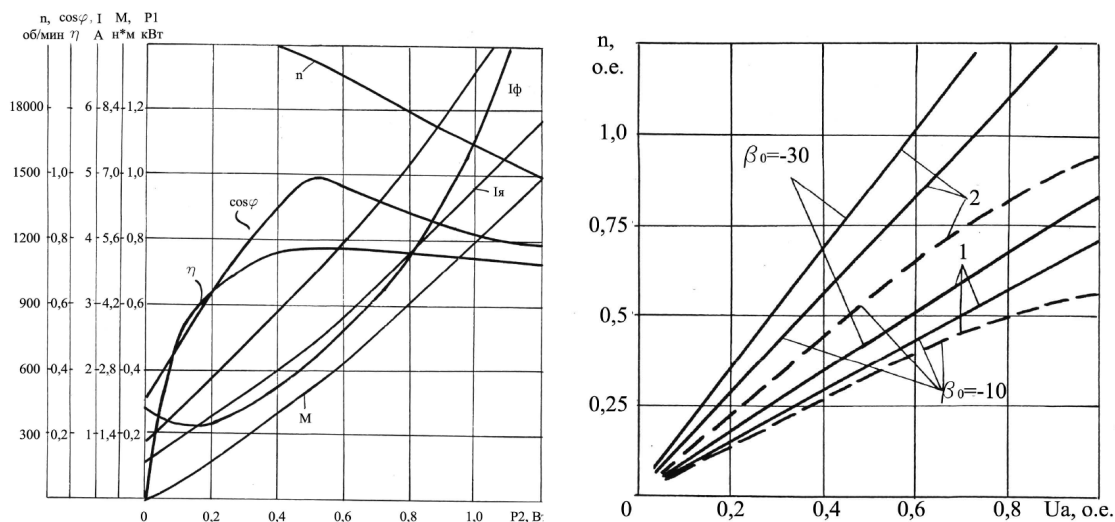


Рис. 10. Рабочие характеристики опытного образца ВДПМ-2 при $b_0 = -20$ эл. град и регулировочные характеристики ВДПМ при прямоугольной ШИМ фазных напряжений УВК для различных углов управления: — — при холостом ходе; ---- — при нагрузке

При стабилизации индукторов воздухом прямая возврата на диаграмме постоянного магнита у двигателей без полюсных наконечников находится несколько ниже, чем у ротора с полюсными башмаками. Кроме того, характеристика $n = f(P_2)$ у образца ВДПМ-2 более нелинейная, чем у образца ВДПМ-1 (см. рис. 9 и 10). Некоторое изменение крутизны этих характеристик объясняется тем, что при высоких частотах вращения индуктивное сопротивление, пропорциональное частоте, соизмеримо с активным сопротивлением обмотки якоря машины. При снижении частоты вращения доля индуктивного сопротивления снижается и при законе изменения тока якоря, близком к линейному, изменяется крутизна характеристик $n = f(P)$.

Поперечный поток реакции якоря в случае ротора типа «звездочка» без полюсных башмаков практически не изменяет основного потока, тогда как у образца ВДПМ-2 происходит значительное искажение потока, что ведет к насыщению полюсного башмака под набегающим краем полюса и, как следствие, к некоторому снижению суммарного потока в зазоре машины. Это вызывает к дополнительное искажение характеристики $n = f(P_2)$ образца ВДПМ-2 (см. рис. 10).

График $\cos \varphi = f(P_2)$ сначала возрастает, достигая максимальной величины, затем снижается вследствие изменения положения вектора напряжения относительно вектора тока. При совпадении этих векторов ВДПМ работает с наименьшим реактивным током. Однако наибольшего значения эта характеристика у образца ВДПМ-2 достигает при меньшем значении полезной мощности на валу машины, чем у образца ВДПМ-1 (см. рис. 9). Это объясняется меньшим искажением главного потока поперечной составляющей реакции якоря в случае ротора без полюсных башмаков и, следовательно, ЭДС у ВДПМ-1 смещается на меньший угол при той же полезной мощности P_2 .

Дальнейшее увеличение угла β_0 в сторону опережения (см. рис. 10) сдвигает максимум кривой $\cos \varphi = f(P_2)$ в сторону большей величины полезной мощности, так как вектор тока в этом случае сдвинут на больший угол относительно вектора напряжения. Зависимость $I_\phi = f(P_2)$ при больших опережающих углах β_0 приобретает резко нелинейный характер, особенно при малых значениях полезной мощности, поскольку в этом диапазоне ВДПМ работает при наибольшей опережаю-

щей коммутации и имеет худший гармонический состав тока. На рис. 10 приведены зависимости $n = f(U_a)$ при широтно-импульсной модуляции напряжения для полностью намагниченного ротора без стабилизации магнитов (кривые 1) и при стабилизации магнитов ротора воздухом (кривые 2). Как показывает анализ кривых у обоих образцов, частота вращения при холостом ходе практически линейно возрастает с увеличением напряжения на обмотке якоря. Однако при нагрузке, которая поддерживалась постоянной во всем диапазоне изменения напряжения, зависимость $n = f(U_a)$ у образцов ВДПМ носит нелинейный характер, поскольку с ростом частоты вращения растет индуктивное сопротивление.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для систем судового электропривода и автоматики, наряду с находящимися в эксплуатации двигателями постоянного тока с управляемыми силовыми преобразователями и асинхронными двигателями с частотным управлением, характерна тенденция к применению перспективных ВДПМ.
2. Представленные разработки и схемы ВДПМ, подтвержденные экспериментом, могут в дальнейшем получить развитие в системах судового электрооборудования несмотря на то, что их внедрение сдерживается пока значительной стоимостью высокоэнергетических постоянных магнитов, недостаточно эффективными мерами защиты их от размагничивания, а также наличием в позиционной системе управления УВК элементов датчиков положения, механически связанных с ротором.
3. В связи с развитием технологии производства новых магнитных материалов, обладающих достоинствами высококоэрцитивных постоянных магнитов и мер по стабилизации их магнитного состояния, а также внедрением микропроцессорных позиционных систем, в том числе бездатчикового управления, появляются новые возможности использования ВДПМ в системах управления движением, навигационном оборудовании и вспомогательном судовом электроприводе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Б. В. Развитие систем электропривода подводных лодок / Б. В. Никифоров // Судостроение. — 1999. — № 5 (726). — С. 23–25.
2. Богданов А. Н. Современные и перспективные алгоритмы управления гребными синхронными электродвигателями / А. Н. Богданов, А. И. Ивановский, П. В. Адамович // Вестник Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 4 (382). — С. 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-103-112.
3. Геча В. Я. К вопросу о предельной энергоэффективности асинхронных машин и двигателей с постоянными магнитами / В. Я. Геча [и др.] // МКЭЭЭ-2018: тр. XVII Междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». 24–28 сентября 2018 г. — М.: Изд-во «Знак», 2018. — С. 158–161.
4. Жуков В. П. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5 ДВМ / В. П. Жуков, В. А. Нестерин // Электротехника. — 2000. — № 6. — С. 19–21.
5. Волокитина Е. В. Новая серия отечественных вентильных электродвигателей для универсальных технологических роботов / Е. В. Волокитина [и др.] // Электротехника. — 2011. — № 7. — С. 13–16.
6. Ишутин В. В. Применение методов оптимизации при проектировании вентильных электродвигателей с постоянными магнитами для специальных электроприводов на ОАО «Лепсе» / В. В. Ишутин // Электротехника. — 2014. — № 4. — С. 46–50. DOI: 10.3103/S1068371214040075.
7. Бабицкий Д. Ю. Выбор магнитных систем роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами с повышенными удельными характеристиками / Д. Ю. Бабицкий [и др.] // МКЭЭЭ-2020: тр. XVII Междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». 27 сентября — 1 октября 2022 г. — М.: Изд-во «Знак», 2022. — С. 90–94.
8. Кан С. В. Исследование влияния ширины и попарного сдвига постоянных магнитов на момент вентильного двигателя / С. В. Кан, С. А. Пахомин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2021. — Т. 64. — № 4–5. — С. 20–23. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-20-23.

9. SINAMICS medium voltage drives — the optimal drive for every application // Siemens official website [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.industry.siemens.com/drives/global/en/converter/mv-drives/Pages/medium-voltage-converters.aspx> (дата обращения: 01.03.2023).
10. ABB Permanent magnet motors [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/permanent-magnet-motors> (дата обращения: 01.03.2023).
11. Wang G. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives — A review / G. Wang, M. Valla, J. Solsona // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2019. — Vol. 67. — Is. 7. — Pp. 5830–5842. DOI: 10.1109/TIE.2019.2955409.
12. Lee J. Pulse Width Modulation Methods for Minimizing Commutation Torque Ripples in Low Inductance Brushless DC Motor Drives / J. Lee, G. C. Lim, J. I. Ha // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2022. — Vol. 70. — Is. 5. — Pp. 4537–4547. DOI: 10.1109/TIE.2022.3189104.
13. Высоцкий В. Е. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин / В. Е. Высоцкий, Ю. В. Зубков, П. В. Тулупов. — М.: Энергоатомиздат, 2007. — 340 с.

REFERENCES

1. Nikiforov, B. V. “Evolution of electric propulsion systems for submarine.” *Shipbuilding* 5(726) (1999): 23–25.
2. Bogdanov, Andrey N., Aleksandr I. Ivanovsky, and Pavel V. Adamovich. “Modern and advanced control algorithms for synchronous propulsion motors.” *Transactions of the Krylov state research centre* 4(382) (2017): 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-103-112.
3. Gecha, V. Ya., A. S. Kobelev, S. A. Kudryashov, L. N. Makarov, and S. V. Skitovich. “K voprosu o predel’noi energoeffektivnosti asinkhronnykh mashin i dvi-gatelei s postoyannymi magnitami.” *Trudy XVII Mezhdunarodnoi konferentsii “Elektromekhanika, Elektrotekhnologii, Elektrotekhnicheskie Materialy i Komponenty”*. Izdatel’stvo «Znak», 2018. 136–139.
4. Zhukov, V. P., and V. A. Nesterin. “Vysokomomentnye ventil’nye elektrodvigateli serii 5DVM.” *Elektrotekhnika* 6 (2000): 19–21.
5. Volokitina, E. V., N. A. Danilov, V. A. Nesterin, and Yu. G. Opalev. “Novaya seriya otechestvennykh ventil’nykh elektrodvigateli dlya universal’nykh tekhnologicheskikh robotov.” *Elektrotekhnika* 7 (2011): 13–16.
6. Ishutinov, V. V. “Application of optimization techniques in the design of brushless DC electric motors with permanent magnets for special electric drives.” *Russian Electrical Engineering* 85.4 (2014): 228–231. DOI: 10.3103/S1068371214040075.
7. Babitskii, D. Yu., G. O. Geinrikh, A. G. Pristup, and A. F. Shevchenko. “Vybor magnitnykh sistem rotorov sinkhronnykh dvigatelei s postoyannymi magnitami s povyshennymi udel’nymi kharakteristikami.” *MKEEE-2020: Trudy XVII Mezhdunar. konf. «Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty»*. M.: Znak, 2022. 90–94.
8. Kan, Sergey V., and Sergey A. Pakhomin. “Study of the influence of the width and the pair shift of permanent magnets on the torque of an electric motor.” *Russian Electromechanics* 64.4–5 (2021): 20–23. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-20-23.
9. SINAMICS medium voltage drives — the optimal drive for every application. Web. 1 March 2023 <<https://www.industry.siemens.com/drives/global/en/converter/mv-drives/Pages/medium-voltage-converters.aspx>>.
10. ABB Permanent magnet motors. Web. 1 March 2023 <<https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/permanent-magnet-motors>>.
11. Wang, Gaolin, Maria Valla, and Jorge Solsona. “Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives — A review.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.7 (2019): 5830–5842. DOI: 10.1109/TIE.2019.2955409.
12. Lee, Juwon, Gyu Cheol Lim, and Jung-Ik Ha. “Pulse Width Modulation Methods for Minimizing Commutation Torque Ripples in Low Inductance Brushless DC Motor Drives.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 70.5 (2022): 4537–4547. DOI: 10.1109/TIE.2022.3189104.
13. Vysotskii, V. E., Yu. V. Zubkov, and P. V. Tulupov. *Matematicheskoe modelirovanie i optimal’noe proektirovanie ven-til’nykh elektricheskikh mashin*. M.: Energoatomizdat, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Высоцкий Виталий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Севастопольский государственный университет
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: VEVysotsky@sevsu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vysotsky, Vitaly E. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: VEVysotsky@sevsu.ru

*Статья поступила в редакцию 22 марта 2023 г.
Received: March 22, 2023.*

SIMULATION OF THE HARMFUL EMISSIONS FORMATION IN THE EXHAUST GASES OF MARINE DIESEL OF MULTI-FUEL SYSTEMS

M. N. Pokusaev, A. Y. Grabarchuk, T. V. Khomenko

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Currently, the world community is increasingly struggling with harmful effects on the environment, the biosphere and the atmosphere in various fields of industry. One of the pollutants is marine transport. The main type of environmental pollution from marine power plants is harmful emissions of CO, CO₂, NO sulfur compounds and other components contained in diesel exhaust gases. The main regulatory document determining the compliance of marine power plants with international environmental requirements is the international convention MARPOL 73/78, developed by the International Maritime Organization (IMO). One of the ways to solve this problem is the use of additional components for fuels on ships, such as water, hydrogen, natural gas, biodiesel, dimethyl ether, ethyl alcohol, etc. In order to pre-calculate the effectiveness of any of the methods for reducing harmful emissions, a simulation of combustion processes in a marine diesel engine when running on diesel fuel with and without the addition of dimethyl ether is carried out. In this study, the AVL Fire program, which is included in the AVL software package and allows you to get visual results on the formation of combustion products in the diesel cylinder, the distribution of temperature flows, soot formation, etc., is used. The 3NVD24 marine diesel engine, which is equipped with the necessary measuring complex for conducting practical research with the possibility of experimental confirmation of the computer modeling results, is used as a prototype for the analysis. Based on the model calculations, various factors of the harmful compounds formation during combustion are analyzed.

Keywords: nitrogen oxide, fuel combustion modeling, biofuels, dimethyl ether, carbon monoxide, harmful emissions into the atmosphere, fuel combustion.

For citation:

Pokusaev, Mikhail N., Aleksandr Yu. Grabarchuk, and Tatiana V. Khomenko. "Simulation of the harmful emissions formation in the exhaust gases of marine diesel of multi-fuel systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500.

УДК 621.436

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ МНОГОТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

М. Н. Покусаев, А. Ю. Грабарчук, Т. В. Хоменко

ФГБОУ ВО «АГТУ», г. Астрахань, Российская Федерация

Темой исследования является актуальный для всего мирового сообщества вопрос борьбы с вредными воздействиями на экологию, биосферу и атмосферу в различных областях промышленности. Отмечается, что одним из загрязнителей является морской транспорт. Основным видом загрязнений окружающей среды со стороны судовых энергетических установок являются вредные выбросы CO, CO₂, NO сернистые соединения и другие компоненты, содержащиеся в выхлопных газах дизелей. Базовым нормативным документом, определяющих соответствие судовых энергетических установок международным экологическим требованиям, является Международная конвенция МАРПОЛ-73/78, разработанная Международной морской организацией (ИМО). Одним из способов решения данной проблемы явилось применение на судах добавочных компонентов для топлив, таких как вода, водород, природный газ, биодизель, диметилловый эфир, этиловый спирт и др. Для предварительного расчета эффективности какого-либо из способов снижения вредных выбросов было проведено моделирование процессов сгорания в судовом дизельном двигателе при работе на дизельном топливе с добавлением диметиллового эфира и без него. В данном исследовании использовалась программа AVL Fire, которая входит в программный комплекс «AVL», позволяя получить наглядные результаты по образованию продуктов сгорания в цилиндре дизеля, распределение температурных потоков, сажеобразование и др.

В качестве прототипа для анализа был использован судовый дизель 3NVD24, оборудованный необходимым измерительным комплексом для проведения практических исследований с возможностью экспериментального подтверждения результатов компьютерного моделирования. На основании модельных расчетов проанализированы различные факторы образования вредных соединений во время сгорания.

Ключевые слова: оксид азота, моделирование сгорания топлива, биотопливо, диметиловый эфир, оксид углерода, вредные выбросы в атмосферу, сгорание топлива.

Для цитирования:

Покусаев М. Н. Моделирование образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля многотопливных систем / М. Н. Покусаев, А. Ю. Грабарчук, Т. В. Хоменко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500.

Введение (Introduction)

Борьба за снижение вредного влияния транспорта, в том числе водного, на окружающую среду приобретает в мире все большее значение, поэтому международные и региональные требования к экологическим характеристикам дизельных установок постоянно ужесточаются. Наиболее важным документом для определения соответствия судовых энергетических установок международным экологическим требованиям является Международная конвенция МАРПОЛ-73/78 [1], [2]. Основным видом загрязнений окружающей среды со стороны судовых энергетических установок являются вредные выбросы CO, CO₂, NO, а также другие компоненты, содержащиеся в выхлопных газах дизелей.

За последнее десятилетие частым явлением в решении данной проблемы служит применение на судах добавочных компонентов для топлив, таких как вода, водород, природный газ, биодизель, диметиловый эфир, этиловый спирт и др. В статье приведены результаты исследования моделирования образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля NVD24 (3C17.5/24) при использовании двух видов топлива: дизельного топлива и смеси дизельного топлива с диметилэфиром (ДМЭ), имеющего химическую формулу C₂H₆O). Далее термин «смесь дизельного топлива и ДМЭ» подразумевает совместную подачу ДМЭ и дизельного топлива в цилиндр дизеля. Для дальнейшего использования полученных данных в процессе проведения экспериментальных исследований по снижению вредных выбросов в отработавших газах дизелей с использованием добавочных компонентов к топливу моделирование выполнялось в программном продукте AVL Fire [3].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты на реальных судах по исследованию влияния добавочных топливных компонентов на экологические характеристики дизелей являются технологически сложными, дорогостоящими и требующими специального одобрения надзорных органов. Моделирование в специализированных компьютерных программах помогает получить большое количество вариантов и провести детальный анализ не только содержания различных вредных компонентов, но и смоделировать процесс образования продуктов горения топлив различного состава и вида на разной стадии процесса сгорания. Среди подобных программных продуктов выделяют: «Дизель-РК» [4], в основе которого методика, разработанная проф. Н. Ф. Разлейцевым и доработанная проф. А. С. Кулешовым; AVL (AVL, Австрия); GT-POWER (Gamma Technologies, США); WAVE (Ricardo Software, Великобритания); KIVA (Los Alamos National Laboratory, США); VECTIS (Ricardo Software, Великобритания). Также следует отметить специализированный программный комплекс «Программное обеспечение расчета топливоподачи и внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием Cyberdiesel 2, разработанный специалистами Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова [5].

Математическим моделированием внутрицилиндровых процессов, в том числе с использованием программного обеспечения, занимались в разное время многие специалисты. В настоящее время можно выделить работы следующих авторов: В. В. Гаврилова, В. Ю. Машенко [5], [6], Ю. И. Булыгина [7], А. А. Иванченко [8], Р. З. Кавтарадзе [9], [12], Н. Hristov [10] и др.

В данном исследовании была использована программа AVL Fir, которая входит в программный комплекс AVL, позволяя получить наглядные результаты образования продуктов сгорания в цилиндре дизеля. В качестве прототипа для анализа был использован судового дизель 3NVD24 (3Ч17,5/24), оборудованный необходимым измерительным комплексом для проведения практических исследований с возможностью экспериментального подтверждения результатов компьютерного моделирования.

Необходимые данные для компьютерного моделирования:

- технические характеристики дизеля NVD24 (3Ч17.5/24);
- компьютерная модель объема цилиндра дизеля, в котором происходит процесс сгорания. (построена при помощи дефрагментации всего объема цилиндра на отдельные элементарные объемы методом конечных элементов [3]);
- выбранные виды топлива: дизельное топливо по ГОСТ 305–2013¹ и смесь дизельного топлива и ДМЭ.

Удельный расход дизельного топлива, согласно расчетам, составил 0,1936 кг/(кВт·ч); удельный расход смеси дизельного топлива и ДМЭ — 0,2122 кг/(кВт·ч), из которых 0,1936 кг/(кВт·ч) — расход дизельного топлива и 0,0186 кг/(кВт·ч) — расход ДМЭ.

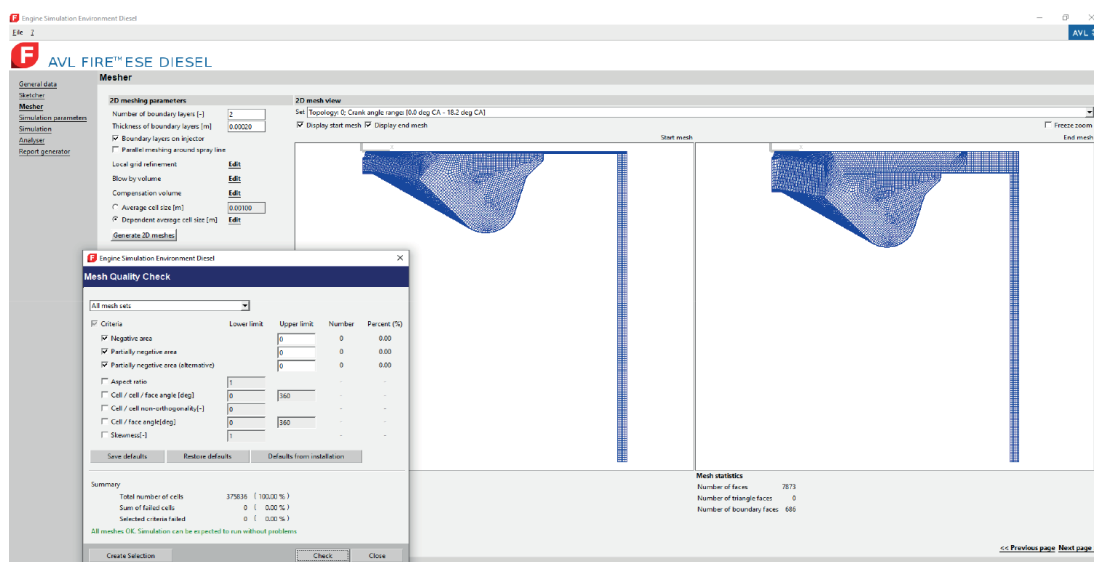


Рис. 1. Компьютерная модель объема цилиндра дизеля NVD24

На рис. 1 приведены результаты создания модели рабочего цилиндра дизеля, используемые далее при моделировании процесса горения топлива.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В результате проведения моделирования в программе AVL Fire были получены диаграммы массового распределения соединений CO, CO₂, NO, температуры газов для двух видов топлива — с подачей в цилиндры дизельного топлива и с подачей смеси: дизельного топлива и ДМЭ. Основные результаты моделирования, представленные на рис. 2–5, в основном не противоречат результатам исследований [11]–[13]. Далее проведем их анализ более подробно для каждого из компонентов вредных выбросов и температуры газов.

Как видно из рис. 2, при подаче смеси дизельного топлива и ДМЭ распределение соединений CO с более низкими массовыми долями (обозначены синим цветом) в середине цилиндра представлено в более широком объеме. Количество соединений CO с наиболее высокими массовыми долями (обозначены красным цветом) при работе дизеля на смеси дизельного топлива и ДМЭ в верхней части цилиндра меньше, чем при работе на дизельном топливе.

¹ ГОСТ 305–2013 Топливо дизельное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.

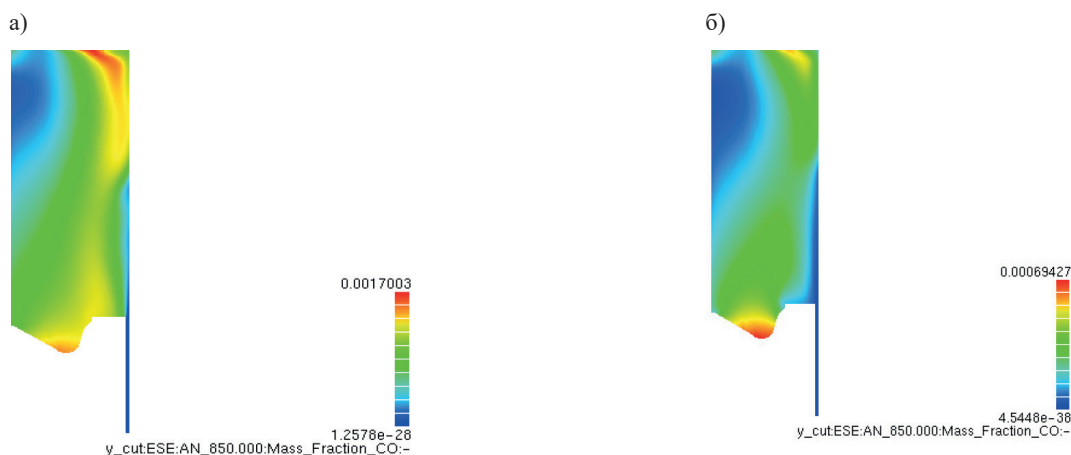


Рис. 2. Распределение соединений CO в цилиндре дизеля в конце такта «сгорание – расширение» (при положении поршня в нижней мертвой точке):
а — с подачи только дизельного топлива;
б — с подачи смеси дизельного топлива и ДМЭ

Согласно рис. 3, при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ ожидается более широкое распределение соединений CO_2 с высокими значениями массовых долей (обозначенных красным цветом) в центральном объеме цилиндра, чем при работе на дизельном топливе. В целом, отличия картины распределения соединений CO_2 при сравнении не так очевидны, как при анализе выбросов CO, рассмотренных ранее. Об этом же свидетельствуют максимальные и минимальные значения массовых долей, приведенных на сравнительных цветовых шкалах диаграмм. К примеру, максимальное значение при использовании дизельного топлива составляет 0,14548, а при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ — 0,15937.

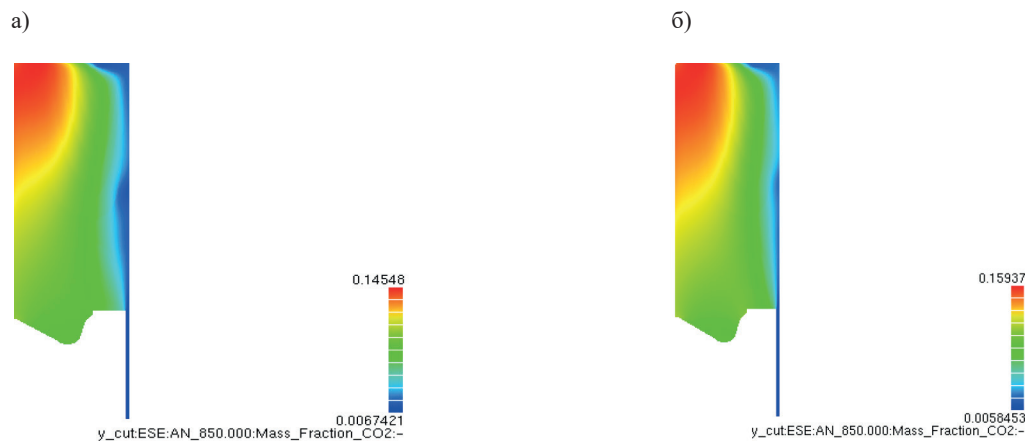


Рис. 3. Распределение соединений CO_2 в цилиндре дизеля в конце процесса «сгорание – расширение» (при положении поршня в нижней мертвой точке):
а — с подачи только дизельного топлива;
б — с подачи дизельного топлива и ДМЭ

Как видно из рис. 4, количество соединений NO с высокими массовыми долями (красного цвета) при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ в центральной части цилиндра будет значительно больше, чем при использовании дизельного топлива. Соединений NO с низкими массовыми долями (синего цвета) у стенок цилиндра при использовании дизельного топлива будет больше, чем при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ.

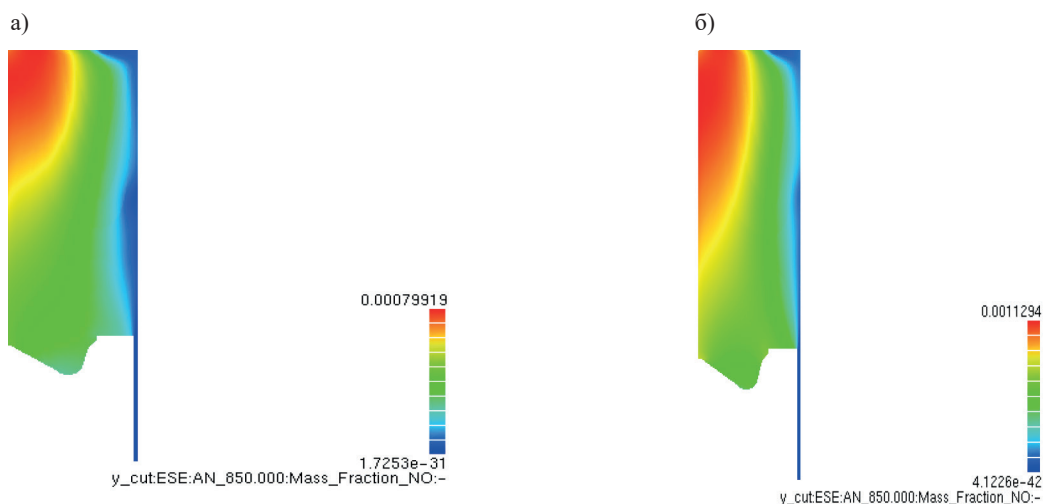


Рис. 4. Распределение соединений NO в цилиндре дизеля
в конце такта «сгорание – расширение»:
а — с подачей только дизельного топлива;
б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

Как видно из рис. 5, максимальная температура газов в конце такта «сгорание – расширение» при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ будет несколько выше, чем при использовании только дизельного топлива, и они равны, соответственно, 1132 и 1014 К. Это может объясняться дополнительной теплотой, образуемой при сгорании ДМЭ. В частности, низшая теплота сгорания дизельного топлива составляет 42,5 МДж/кг, а ДМЭ — 28,8 МДж/кг [12]. При указанном ранее удельном расходе дизельного топлива в смеси 0,1936 кг/(кВт·ч) его удельная теплота сгорания составит 8,228 МДж/(кВт·ч), а для ДМЭ при удельном расходе 0,0186 кг/(кВт·ч) — 0,535 МДж/(кВт·ч), что составит 6,5 % от удельной теплоты дизельного топлива. Таким образом, вносимая дополнительная теплота от сгорания ДМЭ приведет к ожидаемому росту повышения температуры газов.

Характер распределения температур в объеме рабочего цилиндра свидетельствует о несколько большем объеме газов, имеющих высокие температуры (выделен красным цветом) в центральной части цилиндра при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ.

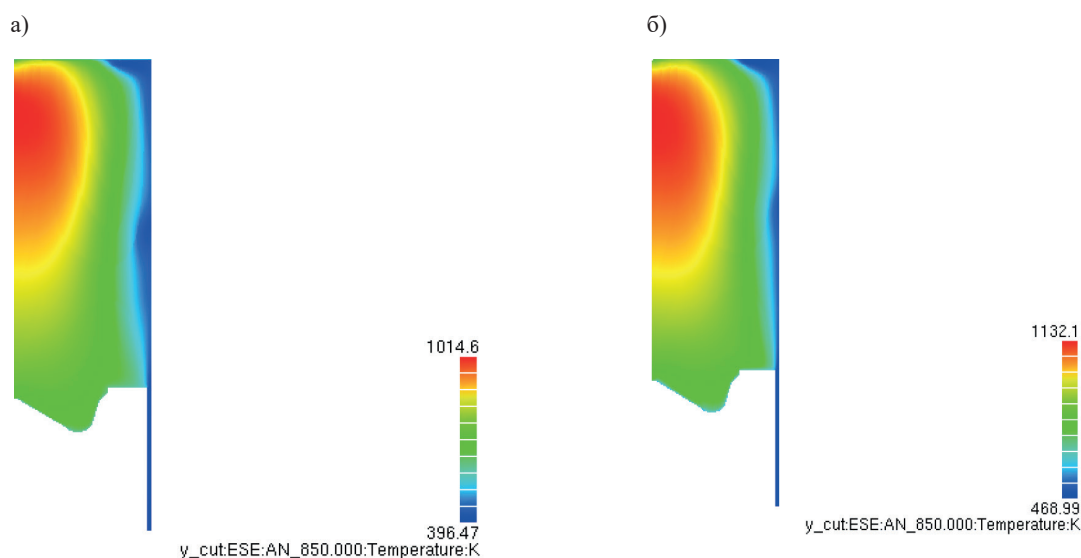
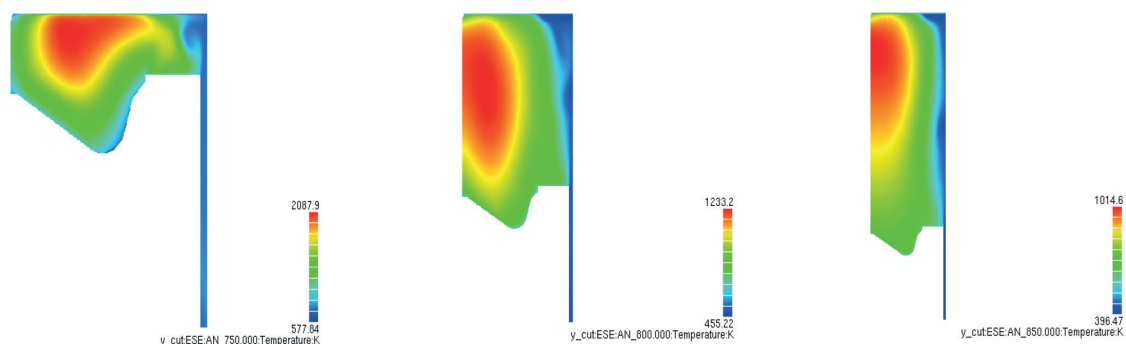


Рис. 5. Распределение температур в цилиндре дизеля
в конце такта «сгорание – расширение»:
а — с подачей только дизельного топлива;
б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

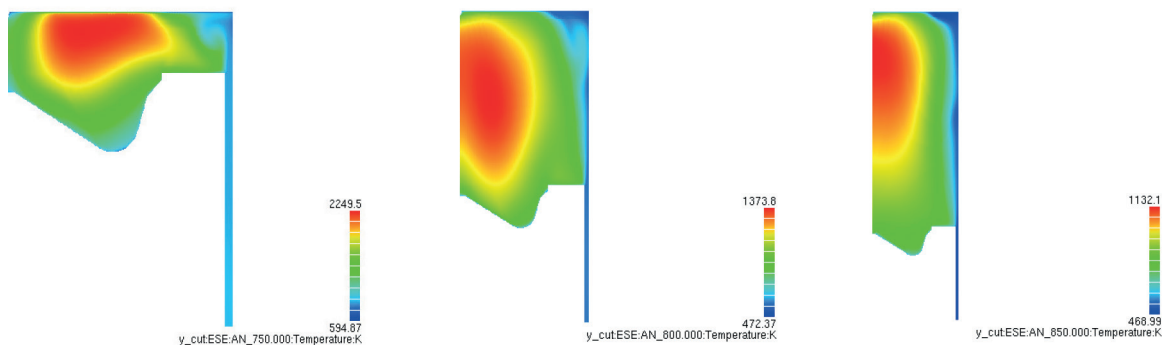
Одним из наиболее интересных вопросов является сравнение не только конечного распределения по массовым долям вредных компонентов по окончании процесса сгорания топлива, но и анализ развития образования компонентов по мере прохождения процесса сгорания. Этот анализ также выполнен и его результаты приведены на рис. 6–9. На рис. 6 представлено распределение температур в процессе сгорания при подаче дизельного топлива и смеси. Как видно из этого рисунка, распределение температур по мере развития процесса сгорания и движения поршня от верхней к нижней мертвой точке происходит практически идентично, как при использовании только дизельного топлива, так и при впрыске смеси: дизельного топлива и ДМЭ.

Следует обратить внимание на более высокие температуры в цилиндре при использовании смеси, что также отражается на некотором изменении формы распределения высоких температур (на рис. 6 обозначены красным цветом) в первый момент процесс сгорания смеси. При дальнейшем развитии процесса сгорания распределение температур, как в первом, так и во втором варианте топлива отличается незначительно.

а)



б)



*Рис. 6. Распределение температур в цилиндре дизеля по мере развития процесса сгорания топлива при такте «сгорание – расширение»:
а — с подачей дизельного топлива;
б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ*

Распределение соединений СО по мере развития процесса сгорания представлено на рис. 7. По характеру диаграмм можно сделать следующие выводы:

1. При работе на дизельном топливе в первые моменты сгорания (на первых диаграммах серии) в нижней части цилиндра, возле доньшка поршня, образуются соединения СО со средней массовой долей (обозначенные зеленым цветом), а при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ подобной картины нет.

2. В конце процесса сгорания дизельного топлива большую часть объема рабочего цилиндра занимают соединения СО именно со средними массовыми долями, но при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ количество соединений СО с высокими массовыми долями (обозначенных красным цветом) меньше, чем при работе на дизельном топливе.

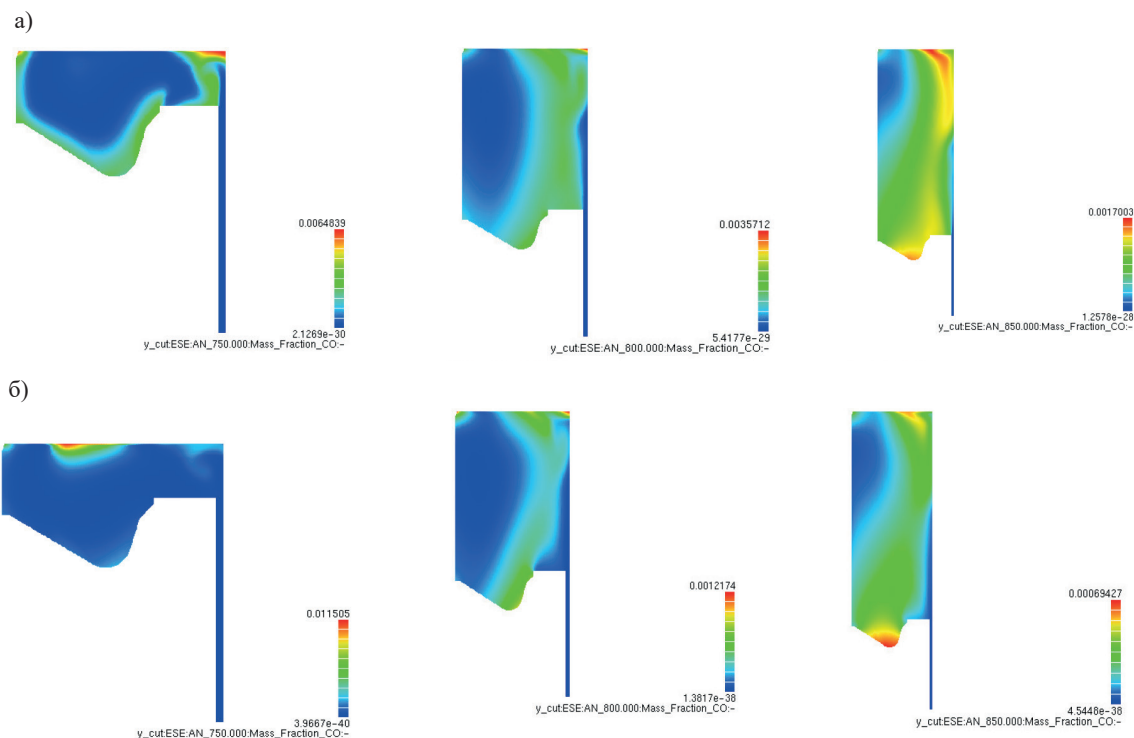


Рис. 7. Распределение соединений CO по мере развития такта «сгорание – расширение»: а — с подачей дизельного топлива; б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

На рис. 8 показано распределение выбросов CO_2 . Из приведенных диаграмм видно, что распределение при использовании дизельного топлива и смеси дизельного топлива и ДМЭ практически идентично.

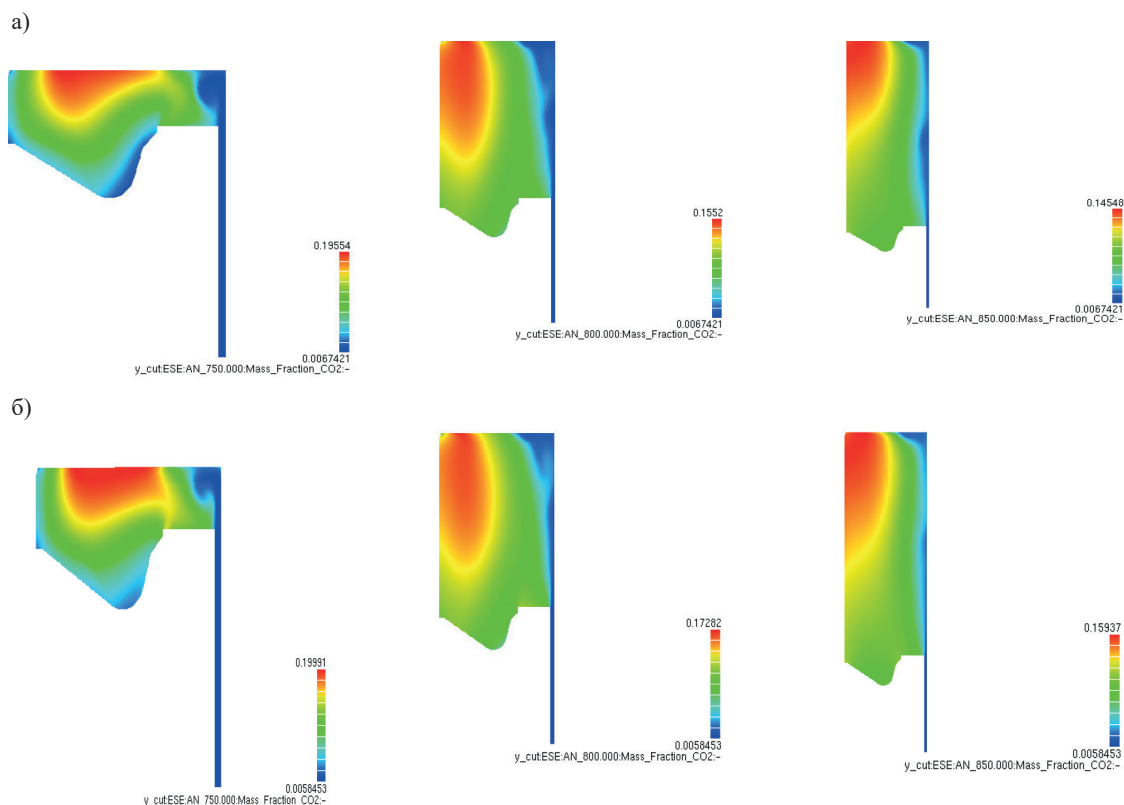


Рис. 8. Распределение соединений CO_2 по мере развития такта «сгорание – расширение»: а — с подачей дизельного топлива; б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

На рис. 9 показано распределение соединений NO. В начале такта «сгорание – расширение» (на первой схеме серии рис. 9) при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ количество компонентов NO с высокими массовыми долями меньше, чем при работе на дизельном топливе, но далее при работе на смеси количество NO с высокими массовыми долями в объеме цилиндра увеличивается.

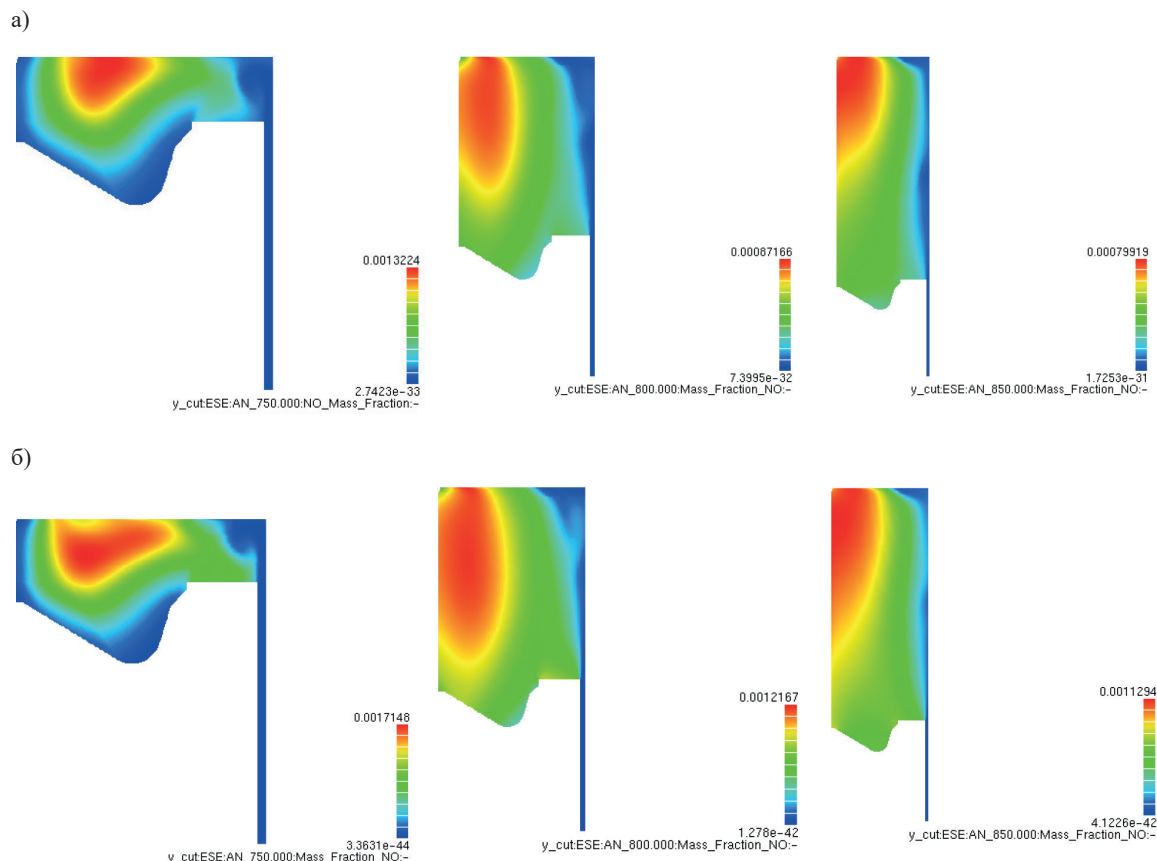


Рис. 9. Распределение соединений NO по мере развития такта «сгорание – расширение»: а — с подачей дизельного топлива; б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

Полученные результаты моделирования согласуются с авторскими исследованиями, приведенными в источниках [14], [15].

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Моделирование в программном продукте AVL Fire позволяет получить распределение массовых долей продуктов сгорания в цилиндре дизеля и оценить динамику процессов образования вредных компонентов без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

2. При анализе картин распределения вредных веществ в конце процесса сгорания установлено следующее:

- при подаче дизельного топлива и ДМЭ количество соединений CO с низкими массовыми долями в средней части объема рабочего цилиндра более высокое, чем при работе на дизельном топливе;

- распределение соединений CO₂ практически идентично как при использовании дизельного топлива, так и при смеси дизельного топлива и ДМЭ;

- количество соединений NO с высокими массовыми долями при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ в центральном объеме рабочего цилиндра значительно больше, чем при использовании дизельного топлива.

3. Максимальная температура газов в конце рабочего хода при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ будет несколько выше, чем при использовании только дизельного топлива и, соответственно, составляют 1132 и 1015 К. Характер распределения температур в объеме рабочего цилиндра свидетельствует о несколько большем объеме газов, имеющих высокие температуры в центральном объеме цилиндра при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ.

4. При анализе развития процесса сгорания топлив установлено следующее:

- распределение температур происходит практически идентично как при использовании дизельного топлива, так и при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ;
- при работе на дизельном топливе в первые моменты сгорания возле доньшка поршня образуются соединения CO, а при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ подобной картины нет;
- характер распределения соединений CO₂ как при использовании дизельного топлива, так и смеси дизельного топлива и ДМЭ практически идентичный;
- в момент начала такта «сгорание – расширение» при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ количество соединений NO с высокими долями меньше, чем при работе на дизельном топливе, но далее при работе на смеси количество соединений NO с высокими массовыми долями в объеме цилиндра увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). — Кн. I и II. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2023. — 862 с.
2. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78) Там же. — Кн. III. — 472 с.
3. AVL Fire Emission. Release 2020 R1, 2023 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.avl.com/en/simulation-solutions> (дата обращения: 20.04.2023).
4. Программный комплекс «Дизель-РК» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://diesel-rk.com/Rus/index.php?page=Download&ysclid=lcj4liyddm1322162> (дата обращения: 20.04.2023).
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017610725 Российская Федерация. Программное обеспечение расчёта топливоподачи и внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием «CyberDiesel 2» / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко; заяв. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — № 2016661760; заявл. 08.11.2016; опубл. 16.01.2017.
6. Гаврилов В. В. Математическое моделирование топливоподачи и локальных внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием с использованием программы CyberDiesel / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 92а–98.
7. Булыгин Ю. И. Моделирование внутрицилиндровых процессов транспортных двигателей с целью повышения их экономичности и экологичности / Ю. И. Булыгин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. — 2005. — № S12. — С. 52–60.
8. Иванченко А. А. Проблемы и опыт математического моделирования экологических и эксплуатационных показателей судового высокооборотного дизеля М482 / А. А. Иванченко, И. А. Щенников, А. А. Иванченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 166–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-166-173.
9. Кавтарадзе Р. З. Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н. Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей / Р. З. Кавтарадзе // Двигателестроение. — 2020. — № 1 (279). — С. 3–9.
10. Hristov H. Modeling of the dependence of the produced amount of hydrogen gas (y) on the amperage of cell (x) of a marine diesel engine SKL 3NVD24 / H. Hristov, I. Bakalov, B. Shopov, D. Yovkov // Pedagogika-Pedagogy. — 2021. — Vol. 93. — No. 6s. — Pp. 273–278. DOI: 10.53656/ped21-6s.24mod.
11. Кавтарадзе З. Р. Влияние термического механизма и процессов теплообмена на образование оксида азота в камере сгорания дизеля / З. Р. Кавтарадзе // Российская национальная конференция по теплообмену четвертая: труды (Москва, 23–27 октября 2006 г.): в 8 т. / РАН, Моск. энергетический ин-т, Нац. комитет РАН по тепломассообмену. — 2006. — Т. 8: Молодежная секция. — С. 73–76.
12. Денежко Л. В. Применение диметилэфира (CH₃)₂O в качестве альтернативного дизельного топлива / Л. В. Денежко [и др.] // Аграрный вестник Урала. — 2016. — № 6 (148). — С. 14.

13. Лазарев Е. А. Температурное состояние рабочего тела в полуразделенной камере сгорания дизеля с газотурбинным наддувом / Е. А. Лазарев, В. Е. Лазарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2012. — № 12 (271). — С. 80–85.

14. Грабарчук А. Ю. Улучшение экологических характеристик судового дизельного двигателя путем дополнительного внешнего смесеобразования с применением диметилового эфира / А. Ю. Грабарчук, Ш. М. Робиуззаман // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2021. — № 1 (71). — С. 36–43. DOI: 10.24143/1812-9498-2021-1-36-43.

15. Покусаев М. Н. Система подачи добавочного компонента в цилиндр дизельного двигателя / М. Н. Покусаев, А. С. Зубарев, А. Ю. Грабарчук // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 67–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-67-73.

REFERENCES

1. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL-73/78), Book I–II*. SPb.: ZAO «TsNIIMF», 2023.

2. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78), Book III*. SPb.: ZAO «TsNIIMF», 2023.

3. AVL Fire Emission. Release 2020 R1, 2023. Web. 20 Apr. 2023 <<https://www.avl.com/en/simulation-solutions>>.

4. Diesel-RK. Web. 20 Apr. 2023 <<https://diesel-rk.com/Rus/index.php?page=Download&ysclid=lcj4liyd dm1322162>>.

5. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. RU 2017610725. Programmnoe obespechenie rascheta toplivopodachi i vnutritsilindrovyykh protsessov v dizele s ob'emnym smeseobrazovaniem «CyberDiesel 2». Russian Federation, assignee. Publ. 16 Jan. 2017.

6. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. “Math modeling of fuel injecting and local inside cylinder processes in spray-type diesel engine by program of CyberDiesel.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2012): 92a–98.

7. Bulygin, Yu. I. “Modelirovanie vnutritsilindrovyykh protsessov transportnykh dvigatelei s tsel'yu povysheniya ikh ekonomichnosti i ekologichnosti.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki* S12 (2005): 52–60.

8. Ivanchenko, Aleksandr Andreevich, Ivan Andreevich Shchennikov, and Andrei Aleksandrovich Ivanchenko. “Problems and experience of mathematical modeling nox emissions and operating characteristics of high-speed diesel engine M482.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 166–173.

9. Kavtaradze R. Z. “Development of combustion theory in Bauman technical university: from Grinevetsky method to modern 3d-models (continuation).” *Dvigatelaystryeniye* 1(279) (2020): 3–9.

10. Hristov, Hristo, Ivaylo Bakalov, Bogdan Shopov, and Dobromir Yovkov. “Modeling of the dependence of the produced amount of hydrogen gas (y) on the amperage of cell (x) of a marine diesel engine SKL 3NVD24.” *Pedagogika-Pedagogy* 93.6s (2021): 273–278. DOI: 10.53656/ped21–6s.24mod.

11. State Standard 305–2013. Diesel fuel. Specifications. M.: Standartinform, 2014.

12. Kavtaradze, Z.R. “Vliyanie termicheskogo mekhanizma i protsessov teploobmena na obrazovanie oksida azota v kamere sgoraniya dizelya.” *Rossiiskaya natsional'naya kon-ferentsiya po teploobmenu chetvertaya: trudy*. Vol. 8. 2006. 73–76.

13. Denejko, L. V., L. A. Novopashin, Yu. V. Pankov, A. A. Sadov, and P. V. Kochetkov. “Using dimethyl ether (CH₃)₂O as an alternative diesel fuel.” *Agrarnyi vestnik Urala* 6(148) (2016): 14.

14. Lazarev, Evgeny A., and Vladislav E. Lazarev. “The temperature condition of the air-fuel mixture into turbo-charged diesel engines combustion chamber.” *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* 12(271) (2012): 80–85.

15. Grabarchuk, Alexander Yuryevich, and Shagor Muhammad Robiuzzaman. “Improving marine diesel engine environmental performance by carburation of dimethyl ether in inlet manifold.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University* 1(71) (2021): 36–43. DOI: 10.24143/1812-9498-2021-1-36-43.

16. Pokusaev, Mikhail Nikolaevich, Anton Sergeevich Zubarev, and Alexander Yuryevich Grabarchuk. “System of supplying the additive component to the cylinder of the diesel engine.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2018): 67–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-67-73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Покусаев Михаил Николаевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр.16/1
e-mail: evt2006@rambler.ru

Грабарчук Александр Юрьевич — аспирант

Научный руководитель:

Покусаев Михаил Николаевич
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: alex45678@mail.ru

Хоменко Татьяна Владимировна —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр.16/1
e-mail: t_v_homenko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pokusaev, Mikhail N. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16/1 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: evt2006@rambler.ru

Grabarchuk, Aleksandr Yu. — Postgraduate

Supervisor:

Pokusaev, Mikhail N.
Astrakhan State Technical University
16/1 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: alex45678@mail.ru

Khomenko, Tatiana V. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16/1 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: t_v_homenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2023 г.

Received: April 5, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512

EFFICIENCY OF FUEL GAS SUPPLY ON LNG-FUELED VESSELS

D. S. Vatolin

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

The widespread use of LNG as a fuel for marine internal combustion engines makes to pay attention to the quality of gas fuel supply systems and its specifics. The objective of this paper is to review modern gas fuel supply systems and analyze their efficiency. The goal is to determine the most important parameters of gas fuel that affect the stability of the working process of marine dual-fuel engines and ways to maintain them within the specified limits. Evaluation of the gas fuel preparation efficiency is carried out on the basis of operational data obtained on the gas carrier vessel board. Data collection is carried out under non-standard operating conditions, which makes it possible to evaluate the quality of the resulting gas fuel with a time-varying composition of the initial natural gas. To analyze the obtained data, modern software, which is used by leading developers of marine diesel engines, is used (Wartsila Methane Number Calculator, AVL Boost™ and Python 3 statistic libraries). The analysis results are approximated for gas fuel supply systems for gas-fueled vessels, but not being gas carriers. This approximation is made taking into account the design features of gas fuel supply systems, since the specificity of the design imposes certain restrictions on the applicability of the conclusions obtained as a result of the previous analysis. Also, attention is paid to the accumulation of residual heavy hydrocarbons in bunker tanks, the excess of which can adversely affect the quality of gas fuel. Since there is no universal way to solve this problem, only general assumptions about possible ways to dispose of them have been made.

Keywords: fuel gas supply systems, dual fuel diesel engines, LNG bunkering systems.

For citation:

Vatolin, Dmitrii S. "Efficiency of fuel gas supply on LNG-fueled vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.

УДК 621.43

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ НА СУДАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

Д. С. Ватолин

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

Темой обзорного исследования является анализ качества газовой топливоподготовки и ее специфики ввиду широкого распространения СПГ в качестве топлива для судовых двигателей внутреннего сгорания. Задачей данной статьи является рассмотрение современных систем газовой топливоподготовки и проведение анализа качества их работы. Целью работы является определение наиболее важных параметров газового топлива, влияющих на стабильность рабочего процесса судовых двухтопливных двигателей, и способы их поддержания в заданных пределах. Оценка эффективности газовой топливоподготовки осуществлялась на основе эксплуатационных данных полученных на борту судна-газовоза. Сбор данных осуществлялся в нестандартных условиях эксплуатации, что позволило оценить качество получаемого газового топлива при изменяющейся во времени композиции исходного природного газа. Для анализа полученных данных применялось современное программное обеспечение, используемое ведущими разработчиками судовых дизельных двигателей (Wärtsilä Methane Number Calculator, AVL Boost™ и статистические пакеты Python 3). Результаты анализа были аппроксимированы для систем газовой топливоподготовки судов, использующих природный газ в качестве топлива, но не являющихся газовозами. Данная аппроксимация производилась с учетом конструктивных особенностей систем газовой

топливоподготовки, так как специфика конструкции накладывает определенные ограничения на применимость полученных в результате предшествующего анализа выводов. Также в работе уделено внимание вопросам накопления в бункерных танках остаточных тяжелых углеводородов, избыточное количество которых может негативно сказываться на качестве газового топлива. Так как универсального способа решения данной проблемы не существует, были выдвинуты общие предположения о возможных способах утилизации остаточных тяжелых углеводородов.

Ключевые слова: системы газовой топливоподготовки, двухтопливный двигатель, системы бункеровки СПГ.

Для цитирования:

Ватолин Д. С. Оценка эффективности топливоподготовки на судах, использующих в качестве топлива сжиженный природный газ / Д. С. Ватолин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.

Введение (Introduction)

Ввиду значительного увеличения доли рынка торговли сжиженным природным газом (СПГ) [1], ужесточения экологических требований в зонах контроля выбросов оксида азота (Nitrogen Emission Control Area — NECA Zone) [2], а также вступления в силу Международного кодекса по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ) количество судов, использующих природный газ в качестве топлива [3], стремительно растет. Так, в начале 2020 г. в эксплуатации находилось более 175 судов-газоходов (не считая 600 судов-газовозов) [4]. По данным Det Norske Veritas [5], в 2021 г. в эксплуатации находилось 251 судно-газоход и были сделаны заказы на постройку еще 403 судна. Столь стремительное развитие флота, использующего СПГ в качестве топлива, послужило серьезным стимулом к развитию двухтопливных дизельных двигателей как наиболее экономичного вида силовых установок. За последние 20 лет производители судовых дизельных двигателей провели большую работу по увеличению экономичности, надежности и устойчивости рабочего процесса двигателей, работающих на природном газе.

Двухтопливные дизельные двигатели предъявляют определенные требования к качеству топлива. Одной из наиболее важных характеристик топлива является его метановое число (МЧ)¹, являющееся характеристикой детонационной стойкости двигателя. Как правило, для устойчивой работы современных двухтопливных двигателей (ДД) МЧ должно быть не ниже 80.

Ввиду того, что композиция природного газа, используемого в качестве топлива, с течением времени может меняться, и, как следствие, будет меняться его МЧ, перед производителями топливных систем ставится задача организовать топливоподачу, способствующую стабилизации этого параметра.

Целью статьи является анализ существующих систем газовой топливоподготовки и оценка их эффективности, а также определение наиболее важных параметров газового топлива, влияющих на стабильность рабочего процесса двухтопливных двигателей, и способа их поддержания в необходимом диапазоне.

Основная часть (The Main Part)

Топливоподача на судах-газовозах. Рассматривается система топливоподготовки СПГ-танкера с дизель-электрической системой электродвижения: главные дизель-генераторы (ДГ), оснащенные системой подачи газа низкого давления (5 бар), которые приводят в действие генераторы переменного тока, вырабатывающие электроэнергию для гребных электродвигателей (ГЭД) — рис. 1.

Для судов с другими типами главных двигателей система топливоподдачи может отличаться, при этом основные принципы ее конфигурирования остаются актуальными. Принципиальная система подачи топлива, применяемая на современных СПГ-танкерах, представлена на рис. 2.

¹ ГОСТ 34704–2020. Газ природный. Определение метанового числа. М.: Стандартинформ, 2021. 13 с.

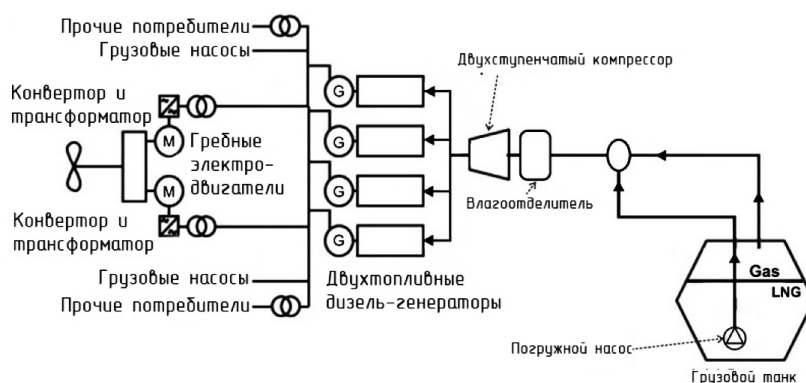


Рис. 1. Дизель-электрическая энергетическая установка СПГ-танкера

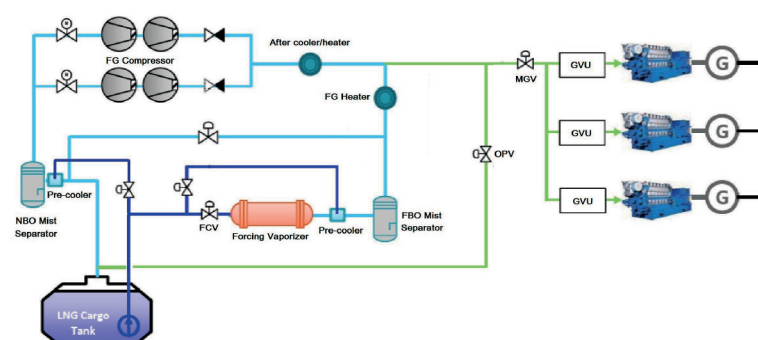


Рис. 2. Принципиальная система подачи топлива

Испарения газа (Natural Boil-Off Gas — NBOG) отбираются из грузовых танков и подаются компрессором (Fuel Gas Compressor — FG Compressor) на главные двигатели. В качестве газового компрессора используется двухступенчатый осерадиальный компрессор фирмы Cryostar типа CM2-200 (рис. 3).

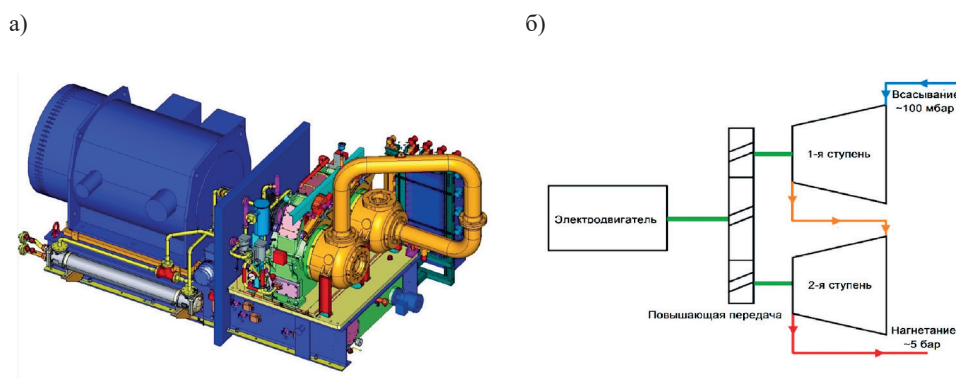


Рис. 3. Газовый компрессор фирмы Cryostar типа «CM2–200»:
а — общий вид; б — принципиальная схема

Основные характеристики: давление на входе — ~100 мбар, давление нагнетания — 5 бар, температура на входе — не выше -90°C , температура на выходе — не выше $+100^{\circ}\text{C}$, частота вращения электродвигателя — 3580 об/мин, частота вращения ступеней компрессора — 29775 об/мин, мощность электродвигателя — 820 кВт, номинальная массовая подача — 6000 кг/ч. Для охлаждения газа после компрессора и подачи его в машинное отделение с рекомендованной температурой $+30 \dots +35^{\circ}\text{C}$, на выходе из компрессора установлен трубчатый теплообменник After Cooler / Heater.

Для защиты ступеней компрессора от эрозии со стороны всасывания установлен влагоотделитель — NBO Mist Separator, имеющий сетчатое исполнение, в котором скорость газа при прохождении множественных слоев сетки снижается и частицы жидкости на них оседают, стекая в нижнюю часть влагоотделителя (Drain Pot), откуда впоследствии дренируются обратно в грузовой танк.

На входе во влагоотделитель установлен охладитель — Pre-cooler, который имеет следующее назначение: во-первых, поддержание достаточно низкой температуры газа перед компрессором; во-вторых, за счет поддержания достаточно низкой температуры, конденсация тяжелых углеводородов — производители двигателей рекомендуют поддерживать температуру перед влагоотделителем на уровне $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, что положительно отражается на МЧ подаваемого на двигатели газа. В охладителе установлены форсунки, которые мелкодисперсно распыляют СПГ внутри него, что позволяет качественно охладить подаваемый газ. СПГ в охладитель подается погружным насосом, установленным в грузовом танке.

В случае, когда расход газа на двигатели превышает нормальную интенсивность испарения СПГ (Normal Boil-Off Rate), для компенсации разницы между ними в работу может быть введен испаритель СПГ — Forcing Vaporizer (рис. 4), который представляет собой трубчатый теплообменник U-образного типа.

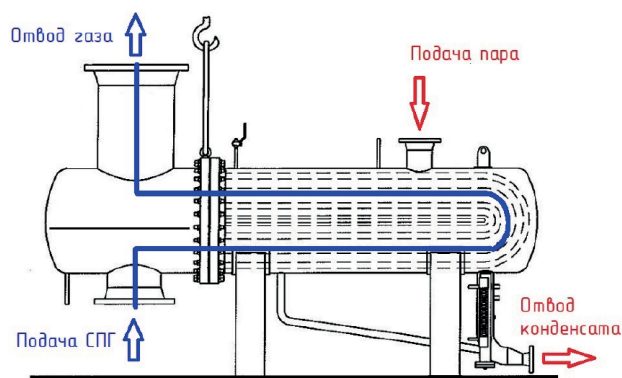


Рис. 4. Испаритель СПГ

Испарение СПГ осуществляется паром, подаваемым во внешний контур, подача сжиженного газа производится во внутренний контур (по трубкам). Производительность испарителя осуществляется изменением подачи СПГ через регулирующий клапан (Flow Control Valve — FCV). В данной конфигурации системы топливоподачи давление СПГ на входе в испаритель — ~ 8 бар, температура СПГ на входе в испаритель — $\sim -150\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление газа на выходе из испарителя — ~ 5 бар, температура газа на выходе из испарителя — $\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За испарителем установлен охладитель (Pre-cooler), задачей которого является понижение температуры газа до того уровня, когда все тяжелые углеводороды могут быть эффективно удалены во влагоотделителе (FBO Mist Separator). Влагоотделитель FBO Mist Separator, как и NBO Mist Separator, имеет сетчатое исполнение.

Сконденсированные углеводороды таким же образом дренируются обратно в грузовой танк. Температура во влагоотделителе поддерживается на уровне $\sim -110\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление — ~ 5 бар. За влагоотделителем установлен подогреватель газа (Fuel Gas Heater), имеющий конструкцию аналогичную испарителю СПГ. Температура на выходе из подогревателя поддерживается на уровне $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление на выходе — ~ 5 бар.

Далее через основной секущий клапан (Master Gas Valve — MGCV) газ подается в блоки регулирующей арматуры двигателей (Gas Valve Unit — GUV). В случае резкого снижения нагрузки на двигатели, для более плавного снижения производительности компрессоров и испарителя, избыточное давление из линии подачи газа на потребители будет сбрасываться обратно на вход во влагоотделитель через перепускной клапан (Overpressure Valve — OPV).

Эффективность топливоподготовки. Оценка эффективности топливоподготовки осуществлялась во время подготовки судна к постановке в сухой док. Для безопасной постановки судна на ремонт в док предварительно требуется во время предшествующей этому выгрузки откачать из его грузовых танков СПГ (насколько это максимально возможно), выпарить неоткачиваемый остаток, прогреть грузовые танки и их барьеры до положительной температуры, после чего произвести их инертизацию и аэрацию.

Известно, что 5–10 % молярной массы СПГ составляют различные остаточные тяжелые углеводороды, такие как пропан, бутан, этан и др. [7], которые оказывают крайне негативное влияние на МЧ испаряющегося газа. Согласно проведенному исследованию [8] фирмы MAN Diesel & Turbo SE, проведенному на борту СПГ-танкера Castillo de Santisteban, метановое число композиции испаряющегося газа может значительно снижаться по мере увеличения интенсивности испарения остатков груза (рис. 5). Это связано с тем, что тяжелые углеводороды имеют более высокие температуры кипения, чем метан, и испаряются в последнюю очередь. Наихудшая композиция в данном исследовании имела значение МЧ, равное 73,2.

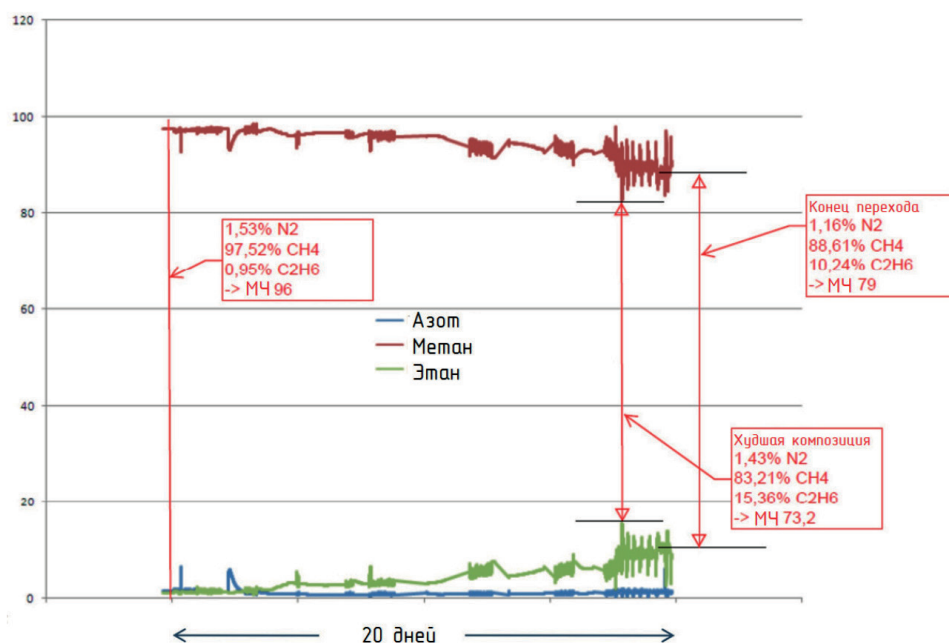


Рис. 5. Зависимость метанового числа от изменения композиции газа

После выгрузки оставшийся на борту СПГ использовался в течение продолжительного времени в качестве топлива для главных двигателей. Качество композиции подаваемого в машинное отделение газа контролируется газовым хроматографом Danalyzer™ 700XA фирмы Rosemount [9] — рис. 6. Пробоотборник, установленный непосредственно в линии подачи газа на главные двигатели, определяет композицию газа, полученную после топливоподготовки. Проба анализируемого газа берется через пробоотборник из линии подачи газа на потребители. Образец фильтруется и подается в анализатор для разделения на фракции и определения компонентов газа.

Хроматографическое разделение анализируемого газа на компоненты осуществляется следующим образом: точный объем анализируемого газа вводится в аналитическую колонну, содержащую неподвижную фазу (насадку), которая представляет собой либо активное твердое вещество, либо инертную твердую подложку, покрытую жидкой фазой (абсорбционное разделение). Исследуемый газ перемещается через колонну с помощью подвижной фазы (газа-носителя — He₂). В колонне происходит селективное замедление компонентов, в результате чего каждый компонент проходит через колонну с разной скоростью. Это позволяет разделить образец на составляющие его газы и пары.

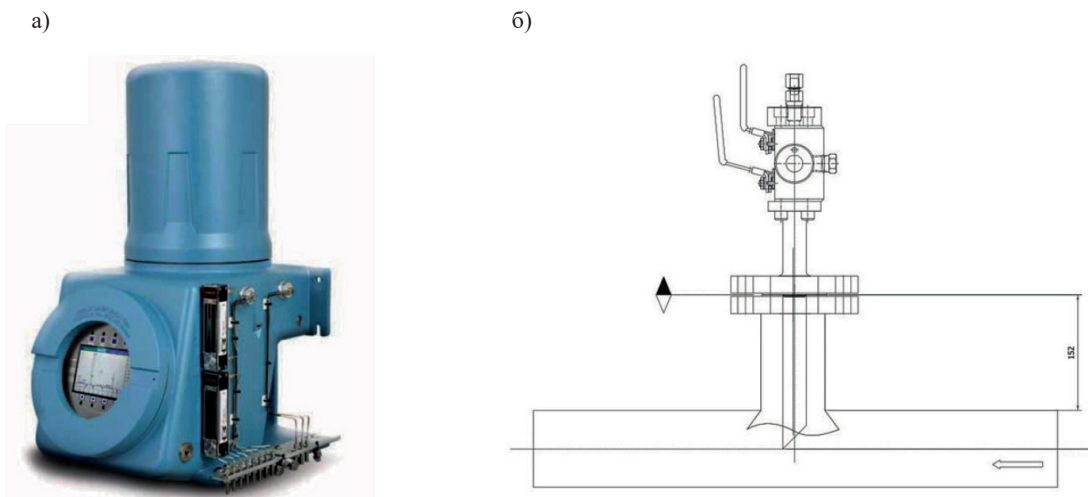


Рис. 6. Газовый хроматограф Danalyzer™ 700XA и пробоотборник:
а — общий вид хроматографа; б — устройство пробоотборника

Детектор, расположенный на выходе из аналитической колонки, определяет элюирование компонентов из колонны и выдает электрические сигналы, пропорциональные концентрации каждого компонента. Выходные сигналы выводятся на удаленный интерфейс.

Для анализа состава и качества газа, подаваемого на главные двигатели, использовались данные, полученные с хроматографа за последний час работы главных двигателей на газовом топливе до окончания выпаривания СПГ и остановки газовой топливоподготовки, а также основные рабочие параметры одного из ГД. Главный дизель-генератор Wartsila W9L50DF имеет следующие технические характеристики: диаметр цилиндра — 500 мм, ход поршня — 580 мм, номинальная мощность — 8775 кВт, частота вращения коленчатого вала — 514 мин⁻¹, среднее эффективное давление — 20 бар, удельный расход газа на номинальной нагрузке, равный 7258 кДж/(кВт·ч).

С целью оптимизации количества данных, используемых при исследовании, для всех параметров был определен коэффициент корреляции Пирсона [10] и отобраны только данные с сильной положительной или отрицательной связью относительно мощности двигателя (ENGINE_LOAD, RELATIVE_BMER). Сильная отрицательная связь (–0,8308) была установлена для уровня открытия байпаса турбины турбокомпрессора (EXH_WASTE_GATE), сильная положительная связь — для температуры отработавших газов (ОГ) на входе в турбокомпрессор (ТК): EXH_GAS_TEMP_TC_INLET — 0,9139 (все рабочие параметры ТК имеют очень высокую степень корреляции друг с другом и с мощностью двигателя, соответственно, и далее представлены только этим параметром); максимальное рабочее сгорание в цилиндрах имеет приблизительно одинаковый уровень корреляции с мощностью двигателя и далее представлено только данными цилиндра № 1: PEAK_PRESSURE_CYL1–0,8915; аналогичная ситуация для температуры ОГ на выходе из рабочих цилиндров: EXH_GAS_TEMP_CYL1–0,8304. Также коэффициент корреляции Пирсона был определен для всех указанных ранее параметров, включая мощность двигателя относительно теплотворной способности газового топлива (MIXED_OUTLET_HEATING_VALUE) и визуализирован с помощью пакета seaborn. PairGrid [11], визуализация представлена на рис. 7, в левой нижней половине которого приведены графики плотности распределения значений, по диагонали — гистограммы распределения значений, в правой верхней половине — распределение значений с указанием коэффициента корреляции Пирсона.

Как видно из представленных на рисунке данных, за последний час работы главного двигателя на газовом топливе не произошло значимых изменений теплотворной способности газа, что свидетельствует о его качественной очистке от тяжелых углеводородов. Также теплотворная способность газа не имеет никаких значимых связей с рабочими параметрами двигателя (коэффициент корреляции Пирсона крайне низок, наибольшее значение 0,22).

Дополнительно была проанализирована композиция газа в начале и конце исследуемого периода. Данные с хроматографа были внесены в онлайн-калькулятор расчета МЧ [12]. Композиция газа в начале исследования: метан CH_4 — 97,45 моль %, этан C_2H_6 — 0,37 моль %, пропан C_3H_8 — 0,04 моль %, N-пентан $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ — 0,03 моль %, азот N_2 — 2,11 моль %, МЧ определенное по методике Wartsila (WMN) — 97, Propane Knock Index (PKI) — 0,3. Композиция газа в конце исследования: метан CH_4 — 97,44 моль %, этан C_2H_6 — 0,37 моль %, пропан C_3H_8 — 0,04 моль %, N-пентан $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ — 0,03 моль %, азот N_2 — 2,12 моль %, WMN — 97, PKI — 0,3. В обоих случаях МЧ композиции находится на довольно высоком уровне — 97, что свидетельствует о высоком качестве топливopодготовки.

Программный пакет AVL BoostTM [13] позволяет моделировать рабочий процесс двигателя с учетом качества используемого топлива. На основе данных о композиции газа в начале и конце исследования в утилите Gas Property Generator, встроенной в AVL BoostTM, были рассчитаны характеристики газа, используемые далее для моделирования рабочего процесса. Характеристики газа в начале исследования: низшая теплота сгорания — 48971,88 кДж/кг, стехиометрическое соотношение воздух / топливо — 16,8565; характеристики газа в конце исследования: низшая теплота сгорания — 48976,67 кДж/кг, стехиометрическое соотношение воздух / топливо — 16,8582.

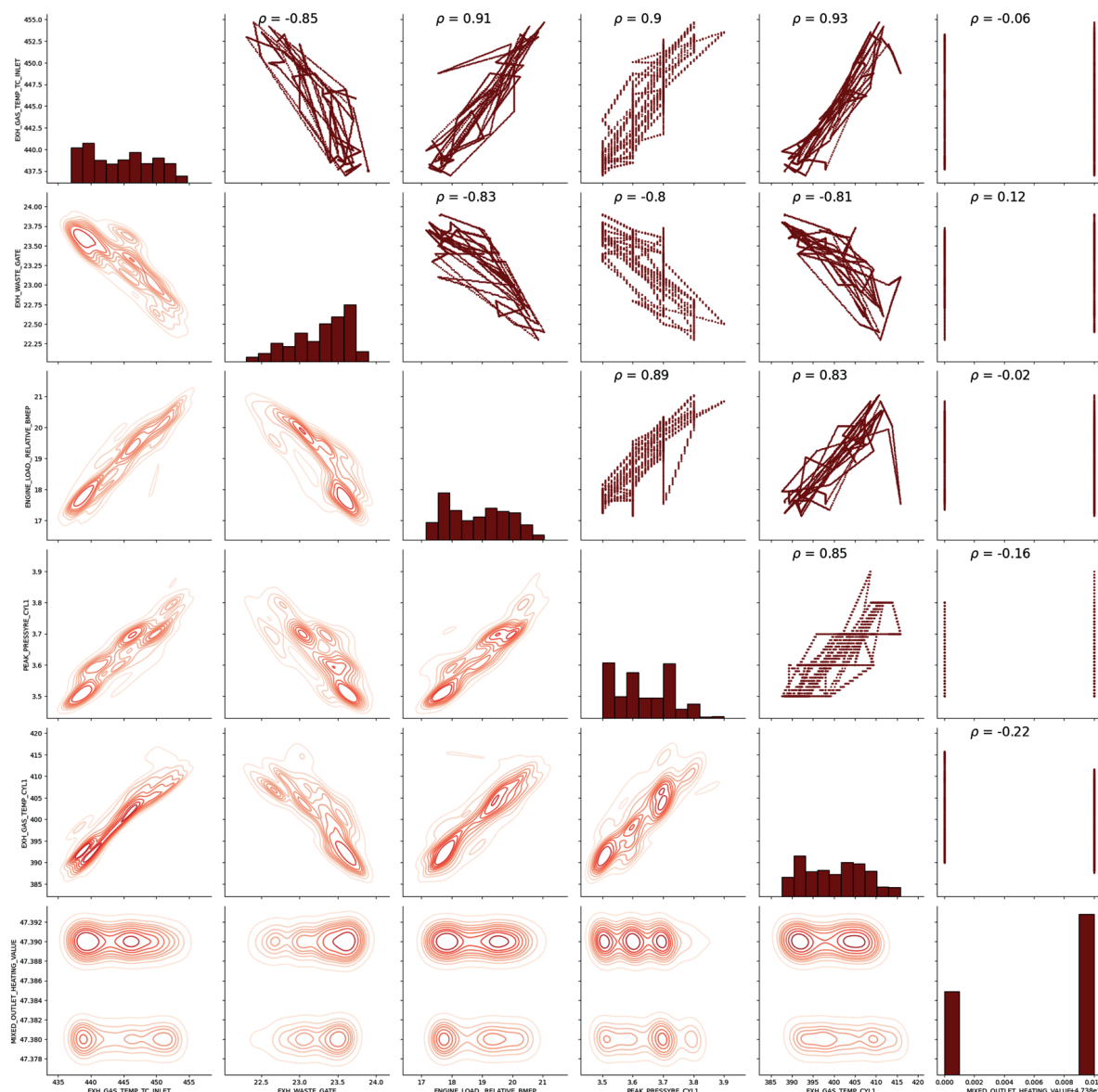


Рис. 7. Визуализация корреляции исследуемых параметров

Указанные характеристики газа использовались при моделировании рабочего процесса двигателя Wartsila W9L50DF (рис. 8). Изменение композиции газа не оказало влияния на удельный расход топлива.

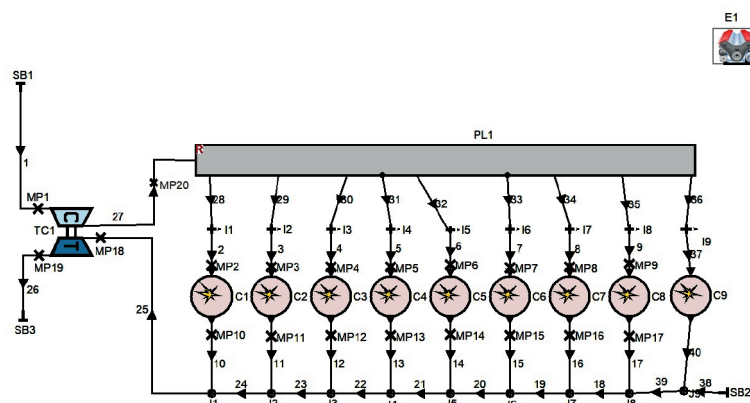


Рис. 8. Модель двигателя Wartsila W9L50DF в AVL Boost™

Дополнительным доказательством высокого содержания тяжелых углеводородов на входе в систему газовой топливоподачи является тот факт, что окончание использования газа в качестве топлива для ГД в процессе выпаривания остатков груза было вызвано блокированием дренажа влагоотделителя (NBO Mist Separator) замерзшими гидрокарбонами, в результате чего в нем произошло повышение уровня отделенных жидких фракций, что привело к аварийной остановке газового компрессора. Таким образом, все ранее изложенные факты свидетельствуют о высоком уровне газовой топливоподготовки на СПГ-танкерах.

Топливоподготовка на судах, использующих СПГ в качестве топлива, но не являющихся газовозами. На фоне вступления в силу Кодекса МГТ и расширения применения СПГ в качестве топлива на современном рынке существует довольно большое количество систем газовой топливоподготовки (Fuel Gas Supply System — FGSS) от таких компаний, как DongHwa Entec [14], MAN ES [15], Kongsberg [16], Marine Service Noord [17], Mitsubishi Heavy Industries [18], Wartsila [19] и т. д. В зависимости от производителя конфигурация FGSS может быть различной и влагоотделитель в ней может как присутствовать, так и отсутствовать. Например, конфигурация FGSS от компании DongHwa Entec (рис. 9) схожа с газовой системой топливоподготовки СПГ-танкера, которая была рассмотрена ранее.

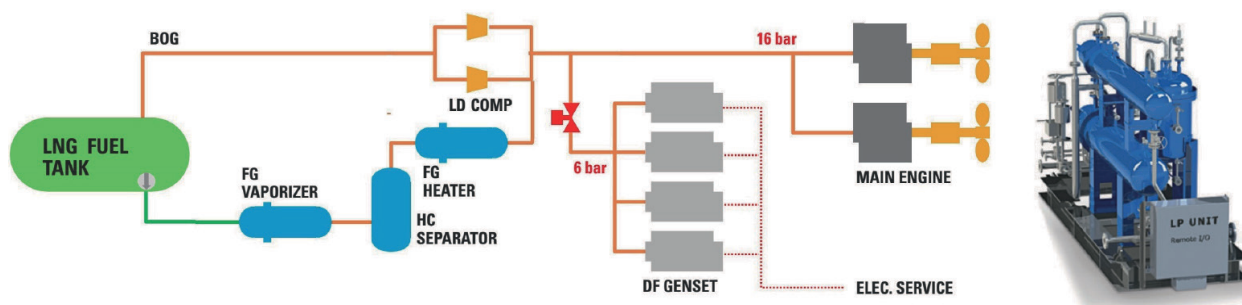


Рис. 9. Система газовой топливоподготовки

Испарившийся газ (Boil-off Gas — BOG) отбирается газовым компрессором (Low Duty Compressor — LD Comp) из бункерного танка с СПГ (LNG Fuel Tank) и подается на главные двигатели (в данном случае на двухтактные двигатели с системой подачи газа низкого давления типа WinGD X-DF [19] или MAN ME-GA [20]). От этих же компрессоров через редукционный клапан газ подается на дизель-генераторы судовой электростанции (Dual Fuel Generators Set — DF GenSet).

В случае, когда расход газа превышает нормальную интенсивность испарения СПГ, погружным насосом установленным в бункерном танке сжиженный газ подается на испаритель (Fuel Gas Vaporizer — FG Vaporizer), откуда он в газообразном состоянии поступает во влагоотделитель, где из него удаляются тяжелые гидрокарбоны (Heavy Hydrocarbons Separator — HC Separator). Тяжелые углеводороды из влагоотделителя дренируются обратно в танк. После влагоотделителя газ проходит через подогреватель (Fuel Gas Heater — FG Heater) и направляется на главные двигатели. Теплоносителем для испарителя и подогревателя является 50%-й раствор моноэтиленгликоля в воде, который подогревается от системы охлаждения главных двигателей. Качество топливоподготовки данной системы аналогично используемой на СПГ-танкерах.

В системах с естественной циркуляцией сред, таких как LNGPac от компании Wartsila (рис. 10), влагоотделитель в конструкции системы газовой топливоподготовки не предусмотрен, так как нет возможности его дренирования обратно в бункерный танк, ввиду специфики работы системы. В основе системы лежит принцип поддержания давления внутри бункерного танка, необходимого для гарантированной подачи газа в рабочие цилиндры двигателя (5 бар для четырехтактных двухтопливных дизельных двигателей с системой подачи газа низкого давления, типа Wartsila DF [21], MAN DF [22] и т. д.). В системе установлен специальный теплообменник для поддержания давления в бункерном танке (Pressure Build-up Unit — PBU). Под давлением, создаваемым в танке, СПГ подается в однопроходный испаритель (Vaporizer — VAP), где переходит в газообразное состояние и подогревается до необходимой температуры для подачи в главные двигатели. Теплоносителем для теплообменника поддержания давления и испарителя, как и в предыдущем случае, является 50%-й раствор моноэтиленгликоля (Glycol Water — GW).

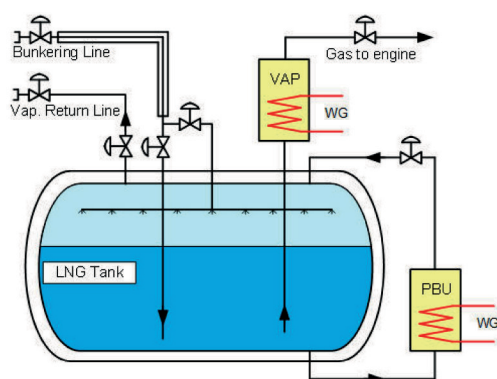


Рис. 10. Система типа LNGPac

С одной стороны, данный принцип построения FGSS значительно упрощает ее конструкцию и снижает стоимость, с другой — качество газа, подаваемого на ГД, будет очень сильно зависеть от изначальной композиции бункерного СПГ. В случае получения бункера с высокой долей тяжелых углеводородов отсутствует возможность производить очистку газа на выходе из танка, что может негативно сказаться на мощности, которую будут способны развить двигатели, так как, согласно рекомендациям производителей, при снижении МЧ ниже 80, эксплуатационная мощность (P_e) должна быть снижена на 1 % на каждую единицу метанового числа во избежание детонаций (knocking) в рабочих цилиндрах.

Заключение (Conclusion)

Современные системы газовой топливоподготовки способны обеспечить необходимый уровень качества топлива (в частности необходимый уровень МЧ) при нормальной эксплуатации судна и даже в ходе некоторых специфичных операций (например, как подготовка к постановке в сухой док). Однако вопрос утилизации тяжелых углеводородов, накопленных за время эксплуатации судна, актуальный для судов, не являющихся газовозами, остается открытым. Данную проблему можно

решить выдачей испарений тяжелых гидрокарбонов на судно-бункеровщик при подготовке к получению СПГ (с их последующей утилизацией в специализированных установках) либо организацией процедуры их сжигания в судовых потребителях (например, во вспомогательных двухтопливных котлах) с учетом их специфики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LNG bunker fuel prices [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/> (дата обращения: 30.04.2023).
2. Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx) (дата обращения: 30.04.2023).
3. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx> (дата обращения: 30.04.2023).
4. Global fleet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sea-lng.org/why-lng/global-fleet/> (дата обращения: 30.04.2023).
5. 2021 was a record year for LNG fueled ships, says DNV [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://safety4sea.com/2021-was-a-record-year-for-lng-fueled-ships-says-dnv/> (дата обращения: 30.04.2023).
6. Tomasz Wlodek MSc P. E. Safety aspects of different composition liquefied natural gas storage processes / P. E. Tomasz Wlodek MSc // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 167–174.
7. Operational experience of the 51/60DF from MAN Diesel & Turbo [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dl-manual.com/doc/operation-manual-mz7811jprp07> (дата обращения: 30.04.2023).
8. Rosemount™ 700XA Gas Chromatograph [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/rosemount-700xa-gas-chromatograph> (дата обращения: 30.04.2023).
9. Коэффициент корреляции Пирсона [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.codecamp.ru/blog/pearson-correlation-coefficient/> (дата обращения: 30.04.2023).
10. seaborn.PairGrid [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.PairGrid.html> (дата обращения: 30.04.2023).
11. Wärtsilä Methane Number Calculator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/methane-number-calculator> (дата обращения: 30.04.2023).
12. BOOST™. Users Manual Version 2017. — AVL List GmbH Graz, Austria, 2017. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL BOOST™ between Admiral Makarov SUMIS and AVL List GmbH, 2019).
13. DH-FGSS MEGI/XDF/DFDE [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.dh.co.kr/ebook/leaflet_marine_DH-FGSS/index.html#page/1 (дата обращения: 30.04.2023).
14. The sophisticated world of LNG [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/lng-gas-supply-and-bunker-systems-eng.pdf?sfvrsn=b32d2eb5_1 (дата обращения: 30.04.2023).
15. LNG Fuel Gas Supply System [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.kongsberg.com/contentassets/63bb1708808b4ece9f2bd9190edd49ac/468252_lng-fuel-gas-supply-system_091020.pdf (дата обращения 30.04.2023).
16. LNG fuel gas supply system (FGSS) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/lng/fuel-gas-supply-system/> (дата обращения: 30.04.2023).
17. LNG fuel gas supply system (LNG FGSS): components [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.mhi.com/products/ship/fgss_components.html (дата обращения: 30.04.2023).
18. Wärtsilä LNGPac [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/lng-as-fuel/lngpac> (дата обращения: 30.04.2023).
19. Ott M. The 2-stroke low-pressure dual-fuel technology: from concept to reality / M. Ott, I. Nylund, R. Alder, T. Hirose, Y. Umemoto, T. Yamada // The 28th CIMAC World Congress 2016, Helsinki, Finland. — CIMAC, 2016. — Paper No. 233.

20. ME-GA — The latest dual-fuel MAN B&W two-stroke engine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/me-ga-eng.pdf?sfvrsn=b8afb1ad_3 (дата обращения: 30.04.2023).

21. Dual fuel engines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines> (дата обращения: 30.04.2023).

22. Providing the flexibility needed for reliable power generation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.man-es.com/energy-storage/products/dual-fuel-engines> (дата обращения: 30.04.2023).

REFERENCES

1. LNG bunker fuel prices. Web. 30 Apr. 2023 <<https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/>>.
2. Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI. Web. 30 Apr. 2023 <[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx)>.
3. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx>>.
4. Global fleet. Web. 30 Apr. 2023 <<https://sea-lng.org/why-lng/global-fleet/>>.
5. 2021 was a record year for LNG fueled ships, says DNV. Web. 30 Apr. 2023 <<https://safety4sea.com/2021-was-a-record-year-for-lng-fueled-ships-says-dnv/>>.
6. Tomasz Wlodek MSc, P. E. "Safety aspects of different composition liquefied natural gas storage processes." *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 4* (2016): 167–174.
7. Operational experience of the 51/60DF from MAN Diesel & Turbo. Web. 30 Apr. 2023 <<https://dl-manual.com/doc/operation-manual-mz781ljprpo7>>.
8. Rosemount™ 700XA Gas Chromatograph. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.emerson.com/en-us/catalog/rosemount-700xa-gas-chromatograph>>.
9. Pearson's correlation. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.codecamp.ru/blog/pearson-correlation-coefficient/>>.
10. seaborn.PairGrid. Web. 30 Apr. 2023 <<https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.PairGrid.html>>.
11. Wärtsilä Methane Number Calculator. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/methane-number-calculator>>.
12. BOOST™. Users Manual Version 2017. AVL List GmbH Graz, Austria, 2017. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL BOOST™ between Admiral Makarov SUMIS and AVL List GmbH, 2019).
13. DH-FGSS MEGI/XDF/DFDE. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.dh.co.kr/ebook/leaflet_marine_DH-FGSS/index.html#page/1>.
14. The sophisticated world of LNG. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/lng-gas-supply-and-bunker-systems-eng.pdf?sfvrsn=b32d2eb5_1>.
15. LNG Fuel Gas Supply System. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.kongsberg.com/contentassets/63bb1708808b4ece9f2bd9190edd49ac/468252_lng-fuel-gas-supply-system_091020.pdf>.
16. LNG fuel gas supply system (FGSS). Web. 30 Apr. 2023 <<https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/lng/fuel-gas-supply-system/>>.
17. LNG fuel gas supply system (LNG FGSS): components. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.mhi.com/products/ship/fgss_components.html>.
18. Wärtsilä LNGPac. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/lng-as-fuel/lngpac>>.
19. Ott, Marcel, Ingemar Nylund, Roland Alder, Takayuki Hirose, Yoshiyuki Umemoto, and Takeshi Yamada. "The 2-stroke low-pressure dual-fuel technology: from concept to reality." *The 28th CIMAC World Congress 2016, Helsinki, Finland*. CIMAC, 2016. Paper No. 233.
20. ME-GA — The latest dual-fuel MAN B&W two-stroke engine. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/me-ga-eng.pdf?sfvrsn=b8afb1ad_3>.
21. Dual fuel engines. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines>>.
22. Providing the flexibility needed for reliable power generation. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.man-es.com/energy-storage/products/dual-fuel-engines>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ватолин Дмитрий Сергеевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vatolinds@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 4 мая 2023 г.
Received: May 4, 2023.*

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-513-523

ALGORITHM FOR AUTOMATION OF THE METHOD OF TESTING STATISTICAL HYPOTHESES ACCORDING TO THE PEARSON CRITERION BY THE MEANS OF MATLAB

A. A. Chertkov

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

The purpose of the work is to develop and improve the methods of computer modeling and digitalization of procedures for testing statistical hypotheses according to consent criteria for use in high-tech software and measuring complexes of automated control systems. In most cases that are important for practice, the analysis of the statistical properties of distributions requires multiple checks performed using numerical methods, which require the tools of powerful software and computing environments. Examples of such cases are the procedures for finding information subsets of features in regression and statistical analysis, as well as identifying parameter deviations in automated control systems. It is noted that the tasks of processing experimental data do not always fit into the framework of the theory of normal processes and have exclusively such hypotheses. To test such hypotheses, modern mathematical statistics has developed criteria based on specially developed probabilistic rules that distinguish between zero and alternative hypotheses. Moreover, if for the testable (zero) hypothesis the distribution of statistics is known exactly or approximately, then for the alternative it has a greater degree of uncertainty and it (the alternative) itself is not a complete negation of the null hypothesis. As the zero and alternative hypotheses move away from each other, the statistics of the consent criterion begins to take a larger absolute value than with the null hypothesis, which allows us to build a critical area on the basis of estimating the set of this statistics values. However, the use of analytical methods for statistical analysis to determine the discrepancy between empirical and hypothetical statistics in practice is associated with the use, as a rule, of complex computational calculation algorithms and the implementation of high requirements for the assessment accuracy, which they cannot provide. To solve this problem, it is proposed to use numerical methods of computer modeling and integration of probability density of distribution according to the Simpson algorithm using the tools of built-in functions of the Statistics Toolbox of the MATLAB environment. The proposed method for automation of statistical analysis of zero and alternative hypotheses is implemented on the example of applying the Pearson criterion to verify compliance with the normal distribution of two random data samples, one of which meets the normal distribution law. The obtained graphic and numerical results of computer modeling confirm the correspondence of one of the testable distributions to a given normal distribution according to the null hypothesis.

Keywords: statistical hypothesis, consent criterion, distribution law, critical area, significance level, sample value, probability density.

For citation:

Chertkov, Alexandr A. "Algorithm for automation of the method of testing statistical hypotheses according to the Pearson criterion by the means of MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 513–523. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-513-523.

УДК 681.5

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТОДА ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ ПО КРИТЕРИЮ ПИРСОНА СРЕДСТВАМИ МАТЛАВ

А. А. Чертков

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

Целью исследования является совершенствование методов компьютерного моделирования и цифровизации процедур проверки статистических гипотез по критериям согласия для последующего использования в высокотехнологичных программно-измерительных комплексах автоматизированных систем управления. При этом в большинстве важных для практики случаев анализ статистических свойств распределений требует проведения множественных проверок, выполняемых с применением численных методов, для которых необходим инструментарий мощных программно-вычислительных сред. Примерами таких случаев являются процедуры нахождения информативных подмножеств признаков в регрессионном и статистическом анализе, а также выявление отклонений параметров в автоматизированных системах управления. Отмечается, что задачи обработки экспериментальных данных не всегда вписываются в рамки теории нормальных процессов, обладая признаками исключительно такого рода гипотез, для проверки которых в современной математической статистике разработаны критерии, основанные на специально разработанных вероятностных правилах, различающих проверяемую (нулевую) и альтернативную гипотезы. Причем, если для проверяемой гипотезы распределение статистики известно точно или приближенно, то для альтернативной оно обладает большей степенью неопределенности и сама она не является полным отрицанием нулевой гипотезы. По мере удаления нулевой и альтернативной гипотез друг от друга статистика критерия согласия начинает принимать большие по абсолютной величине значения, чем при нулевой гипотезе, что позволяет на основе оценки множества значений этой статистики строить критическую область. Однако использование аналитических методов статистического анализа для определения расхождения эмпирической и гипотетической статистик на практике сопряжено с применением, как правило, сложных вычислительных алгоритмов расчета и реализацией высоких требований к точности оценки, которые они обеспечить не могут. Для решения этой проблемы в работе предлагается использование численных методов компьютерного моделирования и интегрирования плотности вероятностей распределения по алгоритму Симпсона с применением инструментария встроенных функций Statistics Toolbox среды MATLAB. Предложенный метод автоматизации статистического анализа нулевой и альтернативной гипотез реализован на примере применения критерия Пирсона для проверки соответствия нормальному распределению двух случайных выборок данных, одна из которых отвечает нормальному закону распределения. Полученные графические и численные результаты компьютерного моделирования подтверждают соответствие одного из проверяемых распределений заданному нормальному распределению согласно нулевой гипотезе.

Ключевые слова: статистическая гипотеза, критерий согласия, закон распределения, критическая область, уровень значимости, выборочное значение, плотность вероятностей.

Для цитирования:

Чертков А. А. Алгоритм автоматизации метода проверки статистических гипотез по критерию Пирсона средствами MATLAB / А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 513–523. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-513-523.

Введение (Introduction)

Анализ статистических свойств распределений требует проведения множественных проверок статистических гипотез, составляющих часть актуальной проблемы сопряжения (стыковки) статистических процедур [1]–[3]. Причем при обработке однородных групп данных наблюдений, не представляющих всей их совокупности, наличие взаимной корреляции среди них приводит к тому, что закон их внутригруппового распределения не будет строго нормальным (гауссовым). С увеличением объема выборки корреляция будет уменьшаться, но ненормальность сохранится. При этом групповое распределение будет стремиться не к нормальному, а к усеченному нормальному распределению. Использование в этом случае алгоритмов регрессионного анализа [4] будет некорректно. С точки зрения практики статистического анализа аналитические методы [5]–[6] вычисления вероятностей (плотности вероятностей) распределения с применением операций интегрирования (дифференцирования) не реализуются в явном виде в средствах цифровой обработки данных. Они могут быть реализованы в них только косвенно (в неявном виде) через операции суммирования / вычитания с аппроксимацией функций в интервалах приближения с применением, как правило, сложных вычислительных алгоритмов в пошаговом режиме.

В связи с этим большой интерес при анализе статистических свойств распределений вызывают численные методы [7]–[9], которые до появления мощных вычислительных средств находили в математической статистике ограниченное применение. Развитый инструментарий этих сред

в большинстве важных для практики случаев позволяет применять весь каталог статистических функций Statistics Toolbox [10] и решать классические задачи статистического анализа [3] с максимальной эффективностью. С помощью численного моделирования можно получить наиболее надежный и относительно простой в реализации вычислительный аппарат для исследования законов распределений и их изменчивости в зависимости от различных факторов и оценок формирования результатов наблюдений. Как известно из [11], на основе компьютерного моделирования можно строить для конкретной ситуации модели распределений любой исследуемой статистики, выявляя закономерности их изменения с ростом объемов выборок [1] и изменением размерности данных.

Проверка статистических гипотез на основе параметрических или непараметрических критериев представляет одну из основных задач [4], [12] статистического анализа. Параметрические критерии применяются при полностью определенном гипотетическом распределении для проверки гипотез о равенстве средних значений двух выборок по критерию Стьюдента (t -критерию) или их дисперсий по критерию Фишера. Причем без предварительной проверки вида распределения применять параметрические критерии нецелесообразно из-за возможных ошибок при проверке основных гипотез, поскольку полностью определенное распределение на практике встречается довольно редко. В связи с этим перед применением параметрических критериев следует определиться с видом (функцией) исследуемого распределения, используя в данном случае непараметрические критерии.

Известные из [2], [3] непараметрические критерии статистики, такие как критерий знаков, критерии Колмогорова, Смирнова, Крамера – Мизеса, Андерсона – Дарлинга и др., не зависят от вида наблюдаемого закона распределения («свободны» от вида распределения) выборок (в частности, от его параметров) и характеризуются несущественной зависимостью распределения статистики от объема выборки. В данном случае отклонение реального распределения статистики от предельного незначительно и практически не оказывает влияние на результаты статистического вывода. Выбор этих критериев не требует большого объема выборки и знания закона распределения, но связан с выполнением ряда условий [13], [14]. В связи с этим они не являются универсальными критериями. Наиболее известным универсальным критерием согласия является *критерий Пирсона*¹ χ^2 [15], [16], позволяющий получить оценку значимости различий между фактическим (выявленным) количеством исходов, попадающих в каждый интервал, и теоретическим количеством, которое можно ожидать в тех же интервалах при справедливости нулевой гипотезы. Иными словами, метод позволяет оценить статистическую значимость различий двух или нескольких относительных показателей (частот, долей).

Распределения статистик классических непараметрических критериев согласия известны и не зависят от вида наблюдаемого закона распределения (в частности, от его параметров), т. е. они являются «свободными от распределения». Это достоинство предопределило широкое использование их в различных приложениях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка репрезентативности выборки с определенной вероятностью позволяет судить о границах генеральной выборки, сделать некоторые предположения об отдельных параметрах случайной величины, таких как математическое ожидание, дисперсия и др. Но при этом нельзя сделать вывод о характере распределения случайной величины. Полную характеристику случайной величины дает закон ее распределения. Однако об этом законе в генеральной совокупности можно получить информацию только из частичных выборок. Поэтому необходимо иметь критерии оценки соответствия статистических законов распределения, полученных из частичных выборок, теоретическим законам распределения, характеризующим генеральную совокупность. Такими критериями являются *критерии согласия*. Так как нормальное распределение встречается довольно часто, как правило, проверяют гипотезу о соответствии выборочного распределения нормальному. Из множества критериев согласия о распределениях наиболее известным является критерий χ^2 («хи-квадрат») Пирсона.

¹ Предложен и разработан в 1900 г. основателем математической статистики английским ученым К. Пирсоном для анализа таблиц сопряженности.

В ходе эксперимента нередко возникает необходимость проверки гипотезы о виде распределения исследуемой выборки. Пусть по выборке $x_1, \dots, x_n$ из некоторой генеральной совокупности нужно проверить гипотезу о том, что генеральная совокупность имеет заданное распределение. Полагаем, что $f_\xi(x)$ — плотность вероятности генеральной совокупности, $f_0(x, \theta_1, \dots, \theta_m)$ — гипотетическая плотность вероятности, известная с точностью до m параметров $\theta_1, \dots, \theta_m$, где m может быть равно нулю. Необходимо проверить двухальтернативную непараметрическую сложную гипотезу:

$$\{H_0: f_\xi(x) = f_0(x, \theta_1, \dots, \theta_m), H_1: f_\xi(x) \neq f_0(x, \theta_1, \dots, \theta_m)\}. \quad (1)$$

Для этого критерием χ^2 множество возможных значений случайной величины ξ разбивается на r интервалов и подсчитывается количество выборочных значений W_i , попавших в каждый интервал (как при построении гистограммы). В качестве критерия согласия используется мера расхождения эмпирических частот относительно теоретических, представляющая собой величину (статистику):

$$\chi^2_{\text{набл}} = \sum_{i=1}^r \frac{(W_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (2)$$

где p_i — гипотетическая вероятность попадания случайной величины ξ в i -й интервал.

Гипотетическая вероятность определяется по формуле, интегрирование в которой выполняется по i -му интервалу r :

$$p_i = \int_i f_0(x, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) dx. \quad (3)$$

Здесь $f_0(x, \theta_1, \dots, \theta_m)$ — гипотетическая плотность вероятности, в которую вместо неизвестных параметров подставлены их оценки $\theta_1, \dots, \theta_m$.

Для определения числа интервалов существует несколько рекомендаций, которые сводятся, например, к использованию одной из двух зависимостей: первой:

$$r = 1,87(n - 1)^{2/5} \quad (4)$$

или второй:

$$r = b \lg(n). \quad (5)$$

Здесь n — объем исследуемой выборки;

$$b = 3 \dots 5.$$

В случае выполнения гипотезы H_0 статистика (4) имеет распределение, которое при $n \rightarrow \infty$ приближается к распределению хи-квадрат (χ^2) с $r - m - 1$ степенями свободы.

Критерий значимости для проверки этой гипотезы — правосторонний критерий вида

$$P(\chi^2_{\text{набл}} > \chi^2_{\text{крит}}) = \alpha, \quad (6)$$

где $\chi^2_{\text{набл}}$, $\chi^2_{\text{крит}}$ — соответственно наблюдаемое (эмпирическое) и критическое значение критерия хи-квадрат (χ^2).

Если все параметры гипотетической плотности вероятности известны, то необходимо считать $m = 0$, т. е. следует воспользоваться таблицами распределения χ^2 с $(r - 1)$ степенями свободы.

К. Пирсон показал, что в соответствии с методом наименьших квадратов мера расхождения между экспериментом и теорией обладает чрезвычайно важным свойством: χ^2 -распределение выражается через наблюдаемые и ожидаемые частоты для всех r интервалов, при этом χ^2 -распределение имеет $k = r - 1$ степень свободы. Число степеней свободы k зависит от того, использовались ли рассматриваемые экспериментальные данные для получения параметров распределения. Выявление параметров распределения понижает число степеней свободы на число выявленных параметров m .

Таким образом, рассматриваемый критерий — параметрический, он учитывает как значение, так и число параметров распределения. Если рассматривать нормальное распределение, то оно,

как известно, описывается двумя параметрами: математическим ожиданием и дисперсией ($m = 2$), отсюда число степеней свободы $k = r - m - 1 = r - 3$.

Алгоритм автоматизации проверки с помощью средств MATLAB по критерию согласия Пирсона сводится к следующим этапам:

1-й этап — выдвигают гипотезу (теоретическое распределение) о виде экспериментального распределения и устанавливают уровень значимости α , по которому определяют критическую область.

2-й этап — задается массив случайных чисел, вид распределения которого проверяется исходя из следующих предпосылок:

– если требуется получить подтверждение о согласии с нулевой гипотезой, то в качестве проверяемой задается выборка с нормальным законом распределения вероятностей с помощью функции $x = \text{normrnd}(\mu, \sigma, n, 1)$, где μ, σ — исходные значения, соответственно, математического ожидания и среднеквадратического отклонения;

– если нужно получить обратное утверждение (согласие с альтернативной гипотезой), то в качестве проверяемой выборки генерируется массив случайных чисел по любому другому закону, кроме нормального, например, близкому к нему по форме закону Стюдента, с помощью функции $x = \text{trnd}(V, n, 1)$, где $V = 1,6-2,6$.

3-й этап — выборка объема n разбивается на r интервалов группирования, где r рассчитывается по формуле (4) или (5). При этом необходимо, чтобы $r > 7$, а каждый интервал содержал не менее пяти выборочных значений. Определяется размах выборки $R = \max(x) - \min(x)$ и длина одного интервала по формуле $L = R/r$.

4-й этап — выполняется подсчет числа W_i наблюдаемых значений исследуемой выборки (эмпирических частот), попавших в каждый интервал, который выполняется автоматически с помощью функции построения гистограммы $[W, t] = \text{hist}(x, r)$.

5-й этап — с помощью оператора суммирования элементов массива $\text{sum}(x)$ определяются статистические оценки выборочных данных для математического ожидания $Mx = (\text{sum}(x)) / n$ и среднеквадратического отклонения $d = \sqrt{\text{sum}((x - Mx).^2) / (n - 1)}$, которые используются в качестве параметров распределения. При этом число степеней свободы устанавливается $k = r - m - 1$, где $m = 2$.

6-й этап — строится гистограмма статистического (для исследуемой выборки значений) и кривая теоретического (нормального) законов распределения, характеризующих генеральную совокупность данных; кривую нормального закона распределения, отвечающего гипотезе H_0 , строим с помощью встроенной функции $f = \text{normpdf}(x, Mx, d)$.

Приведем фрагмент программы, позволяющей построить гистограмму исследуемого и получить кривую теоретического распределений на одном графике:

```
f=normpdf(x, Mx, d);
w=W/n;
j = 1;
for i=1:2:2*r
    a(i)=(xmin-L)+L*j;
    a(i+1)=(xmin-L)+L*(j+1)-0.001;
    b(i)=w(j)/L;
    b(i+1)=w(j)/L;
    j=j+1;
end
plot(a, b, 'b', x, f, 'r');
ylabel('Плотность')
```

7-й этап. С целью определения наблюдаемой статистики $\chi^2_{\text{набл}}$ по формуле (2) выполняется расчет гипотетической вероятности p_i путем интегрирования, согласно (3), функции плотности вероятностей f_0 в каждом i -м интервале группирования ($i = 1, \dots, r$). С применением вычислительных средств эта операция реализуется только численными методами, из которых наибольшую

точность до 10^{-6} имеет метод Симпсона (с аппроксимацией подынтегральной функции в узловых точках отрезками парабол). В MATLAB операция интегрирования методом Симпсона реализуется с помощью встроенной функции

$$Q = \text{quad}(FUN, A, B),$$

где A, B — нижний и верхний пределы интегрирования; FUN — подынтегральная функция, которая описана в виде в файл-функции «*myfun.m*».

Фрагмент программы, иллюстрирующей численное интегрирование с помощью функции *quad*:

% Определение теоретической вероятности по методу Симпсона:

a1=xmin; b1=a1+L;% верхний и нижний пределы интегрирования

for j=1: r

s=0;% начальная сумма

n1=10;% количество разбиений каждого участка

L1=(b1-a1)/n1;% шаг разбиения участка на интервалы

*for i=a1:2*L1: b1-2*L1*

s=quad(@(x)myfun(x, Mx, d), a1, b1);

end

p(j)=s;% теоретическая вероятность для j-го интервала

a1=a1+L;

b1=b1+L;

end

8-й этап — на основании (2) рассчитывается значение наблюдаемой статистики $\chi^2_{\text{набл}}$ расхождения эмпирических частот относительно теоретических. Затем рассчитывают критическое значение критерия хи-квадрат ($\chi^2_{\text{крит}}$) с применением обратной функции кумулятивного распределения хи-квадрата, имеющей синтаксис *chi2inv(P, V)*, где $P = (1 - \alpha)$ — вероятность того, что статистика критерия попадает в область принятия нулевой гипотезы; V — число степеней свободы.

В качестве операторной функции статистика $\chi^2_{\text{крит}}$ записывается в следующем виде:

$$\text{Chietabl} = \text{chi2inv}(1 - \alpha, k).$$

9-й этап — в завершение процедуры проверки применяют критерий согласия Пирсона (χ^2 -критерий) согласно следующему правилу: если выполняется условие $\chi^2_{\text{набл}} \leq \chi^2_{\text{крит}}$, то эмпирическое (наблюдаемое) значение статистики не попадает в критическую область и, следовательно, гипотезу H_0 принимают, в обратном случае при $\chi^2_{\text{набл}} > \chi^2_{\text{крит}}$ значение наблюдаемой статистики попадает в критическую область и гипотезу H_0 отвергают.

В заключение следует отметить, что критерий хи-квадрат — это критерий, который асимптотически верен, т. е. выборочное распределение можно сделать сколь угодно близким к распределению хи-квадрат путем увеличения размера выборки.

Результаты (Results)

На основе предложенного алгоритма автоматизации на первом этапе эксперимента была выполнена проверка гипотезы о нормальном распределении генеральной совокупности данных, в качестве которой генерировался массив случайных чисел с нормальным законом распределения вероятностей с помощью функции $x = \text{normrnd}(\mu, \sigma, n, 1)$. Оценка статистической значимости различий распределений (проверяемого и нормального) выполнялась с помощью расчета относительных значений эмпирических и теоретических частот.

С целью оценки соответствия (близости) проверяемого распределения нормальному на рис. 1 приведены графики, демонстрирующие степень аппроксимации функции, описывающей плотность вероятностей нормального распределения гистограммой исследуемого распределения выборки.

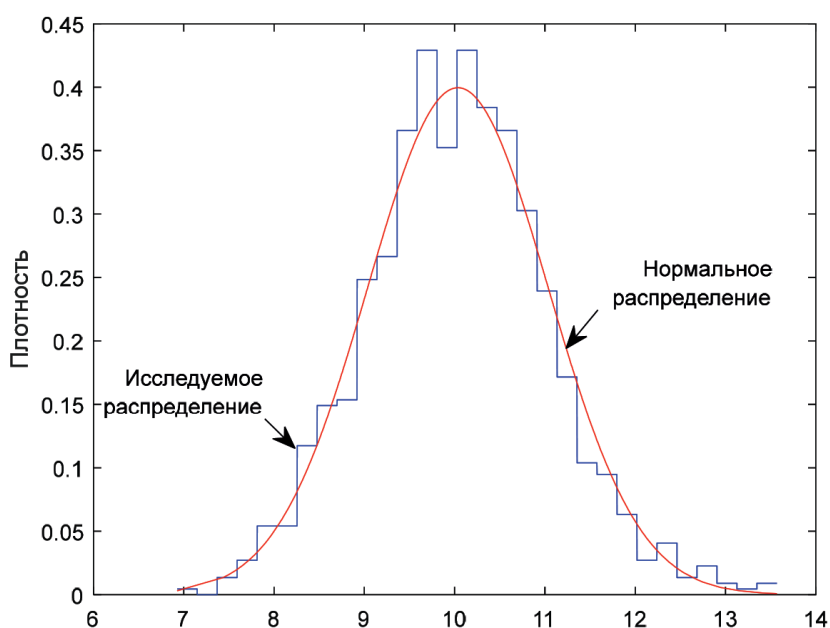


Рис. 1. Аппроксимация теоретической кривой нормального распределения гистограммой исследуемой выборки с нормальным распределением

Приведем численные результаты выборочных значений параметров проверяемого распределения, а также наблюдаемого и табличного значений критерия хи-квадрат (χ^2) на первом этапе эксперимента:

Максимальные и минимальные значения в массиве:

xmax =
13.5699

xmin =
6.9278

r =
30

Выборочное среднее:

Mx =
10.0365

Выборочное среднеквадратичное отклонение:

d =
0.9984

Наблюдаемое значение критерия хи-квадрат

chie =
34.2031

Количество степеней свободы

k =
27

Критическое значение критерия хи-квадрат:

chietabl =
40.1133

Вывод. Распределение проверяемой выборки подчиняется нормальному закону
>>

На основе сравнения полученных на первом этапе эксперимента результатов численных оценок наблюдаемого $\chi^2_{\text{набл}} = 34.2031$ и табличного (критического) $\chi^2_{\text{крит}} = 40.1133$ значений критерия хи-квадрат (χ^2) следует, что условие для принятия гипотезы $H_0: \chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{крит}}$, выполняется. Следовательно, гипотеза H_0 о нормальном распределении проверяемой выборки данных подтверждается.

На втором этапе эксперимента производилась проверка гипотезы H_0 о нормальном распределении выборки данных, в качестве которой генерировался массив случайных чисел с отличным от нормального законом распределения, но близким к нему по форме распределением Стьюдента, с помощью функции $x = \text{trnd}(2.5, n, 1)$. Соответствующие этому этапу графики исследуемого и нормального распределений, аналогичные рис. 1, приведены на рис. 2.

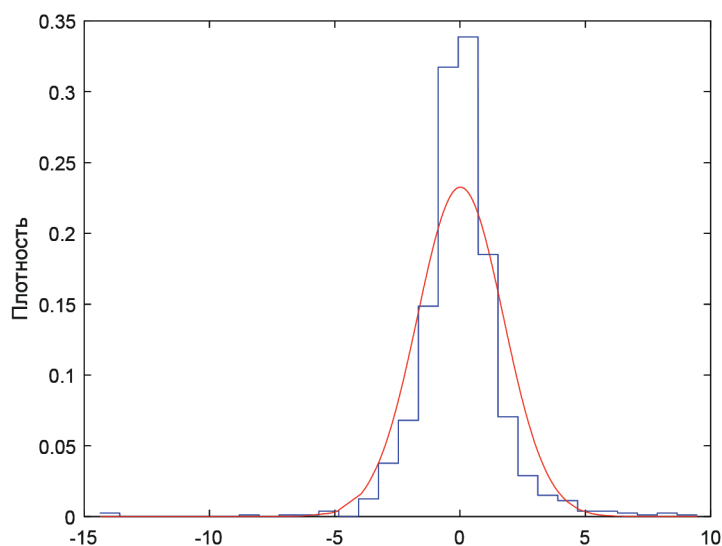


Рис. 2. Аппроксимация теоретической кривой нормального распределения гистограммой исследуемой выборки с распределением по закону Стьюдента

Приведем численные оценки тех же самых параметров, но для отличного от нормального проверяемого закона распределения, а также вывод, подтверждающий непринадлежность проверяемого распределения нормальному:

xmax =
22.8397

xmin =
-11.8021

r =
30

Выборочное среднее:

Mx =
-0.0138

Выборочное среднеквадратичное отклонение:

d =
2.0300

Наблюдаемое значение критерия хи-квадрат

chie =
3.5223e+12
Количество степеней свободы

k =
27

Критическое значение критерия хи-квадрат:

chietabl =
40.1133

Вывод. Распределение проверяемой выборки не подчиняется нормальному закону.

На основе сравнения полученных на втором этапе эксперимента результатов численных оценок наблюдаемого $\chi^2_{\text{набл}} = 3.5223 \cdot 10^{12}$ и табличного (критического) $\chi^2_{\text{крит}} = 40.1133$ значений критерия хи-квадрат (χ^2) следует, что условие для принятия гипотезы $H_0: \chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{крит}}$, не выполняется. Отсюда следует, что гипотеза H_0 о нормальном распределении проверяемой выборки данных отклоняется и принимается альтернативная гипотеза.

Обсуждение (Discussion)

Результаты численного моделирования оцениваемых по критерию Пирсона параметров, а также аппроксимации гипотетического нормального распределения исследуемыми распределениями выборок генерируемых массивов данных, представленные на рис. 1 и 2, получены в автоматическом режиме и полностью соответствуют ожидаемым результатам проверки гипотезы H_0 ; свидетельствуют о ее подтверждении в первом случае (при нормальном распределении выборки) и ее отклонении — во втором случае (при отличном от нормального распределении выборки). Это подтверждает работоспособность алгоритма автоматизации и его точность.

Заключение (Conclusion)

В работе приведены результаты исследований, связанные с построением и практической реализацией алгоритма автоматизации метода проверки статистических гипотез, позволяющего получить оцениваемые параметры распределений по критерию согласия Пирсона. Корректность и реализуемость предлагаемых технических решений подтверждена на примере эксперимента, состоящего из двух сценариев проверки основной гипотезы о нормальном распределении двух генерируемых массивов данных одного и того же объема, один из которых имеет нормальное,

а другой — отличное от нормального закона распределение. Полученные оценки и решения по критерию Пирсона о принадлежности распределений проверяемых массивов данных нормальному закону распределения полностью соответствуют ожидаемым результатам.

Предложенный алгоритм автоматизации и численного моделирования процессов проверки статистических гипотез применительно к критерию согласия Пирсона (хи-квадрат) позволяет широко использовать инструментарий статистических функций MATLAB для реализации вероятностной и статистической моделей закона распределения и принимать обоснованные решения при обработке данных в системах автоматизированного управления и измерения на объектах водного транспорта. Кроме того, предложенные решения находятся в основе дальнейшего развития и совершенствования методов компьютерного моделирования и цифровизации процедур проверки статистических гипотез по критериям согласия для использования в высокотехнологичных программно-измерительных комплексах автоматизированных систем управления. Это связано с тем, что в большинстве важных для практики случаев анализ статистических свойств распределений требует проведения множественных проверок, выполняемых с применением численных методов, для которых требуется инструментарий мощных программно-вычислительных сред. Примерами таких случаев являются процедуры нахождения информативных подмножеств признаков в регрессионном и статистическом анализе, а также выявление отклонений параметров в автоматизированных системах управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antonov A. V. Regarding the planning of testing scope for new equipment samples / A. V. Antonov, V. A. Chepurko, V. E. Chekhovich, V. F. Ukrainsev // *Dependability*. — 2016. — № 3. — Pp. 3–7. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-3-7.
2. Лемешко Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // *Сибирский журнал индустриальной математики*. — 2008. — Т. 11. — № 2 (34). — С. 96–111.
3. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. — 888 с.
4. Мещеряков В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с Matlab / В. В. Мещеряков. — М.: Диалог-МИФИ, 2009. — 448 с.
5. Кулаичев А. П. Методы и средства комплексного анализа данных / А. П. Кулаичев. — М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
6. Льюис К. Д. Методы прогнозирования статистических данных / К. Д. Льюис. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 133 с.
7. Мэтьюз Д. Г. Численные методы. Использование MATLAB / Д. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. — М.: Вильямс, 2001. — 720 с.
8. Лапчик М. П. Численные методы / М. П. Лапчик, М. И. Рагулина, Е. К. Хеннер. — М.: ИЦ «Академия», 2007. — 384 с.
9. Кетков Ю. Л. MATLAB 7: программирование, численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 752 с.
10. Иглин С. П. Математические расчеты на базе MATLAB / С. П. Иглин. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 629 с.
11. Поршнев С. В. Компьютерный анализ и интерпретация эмпирических зависимостей / С. В. Поршнев, Е. В. Овечкина, М. В. Машенко, А. В. Каплан, В. Е. Каплан. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2010. — 336 с.
12. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — 12-е изд., перераб. — М.: Высш. обр., 2006. — 478 с.
13. Corder G. W. Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach / G. W. Corder, D. I. Foreman. — New York: Wiley, 2009. — 264 p.
14. Tsybakov A. B. Introduction to Nonparametric Estimation / A. B. Tsybakov. — Springer, 2008. — 224 p.
15. Greenwood P. E. A guide to chi-squared testing / P. E. Greenwood, M. S. Nikulin. — Wiley-Interscience, 1996. — 304 p.

16. Bagdonavicius V. B. Chi-square goodness-of-fit test for right censored data / V. B. Bagdonavicius, M. S. Nikulin // International Journal of Applied Mathematics and Statistics. — 2011. — Vol. 24. — Is. SI-11A. — Pp. 30–50.

REFERENCES

1. Antonov, Alexander V., Valery A. Chepurko, Vladimir E. Chekhovich, and Vladimir F. Ukraintsev. “Regarding the planning of testing scope for new equipment samples.” *Dependability* 3 (2016): 3–7. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-3-7.
2. Lemesko, B. Yu., S. B. Lemesko, and S. N. Postovalov. “Sravnitel’nyi analiz moshchnosti kriteriev soglasiya pri blizkikh konkuriruyushchikh gipotezakh. I. Proverka prostykh gipotez.” *Journal of Applied and Industrial Mathematics* 11.2(34) (2008): 96–111.
3. Lemesko, B. Yu., S. B. Lemesko, S. N. Postovalov, and E. V. Chimitova. *Statistical data analysis, simulation and study of probability regularities. computer approach*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011.
4. Meshcheryakov, V. V. *Zadachi po statistike i regressionnomu analizu s Matlab*. M.: Dialog-MIFI, 2009.
5. Kulaichev, A. P. *Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh*. M.: FORUM, INFRA-M, 2006.
6. Lewis, C. D. *Industrial and Business Forecasting Methods*. Butterworth-Heinemann, 1982.
7. Mathews, John, and Kurtis Fink. *Numerical Methods Using Matlab*. — 4th Edition. — Pearson, 2003.
8. Lapchik, M. P., M. I. Ragulina, and E. K. Khenner. *Chislennyye metody*. M.: Iz-datel’skii tsentr «Akademiya», 2007.
9. Ketkov, Yu. L., A. Yu. Ketkov, and M. M. Shul’ts. *MATLAB 7: programmirovaniye, chislennyye metody*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005.
10. Iglin, S. P. *Matematicheskie raschety na baze MATLAB*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005.
11. Porshnev, S. V., E. V. Ovechkina, M. V. Mashchenko, A. V. Kaplan, and V. E. Kaplan. *Komp’yuternyy analiz i interpretatsiya empiricheskikh zavisimostei*. M.: OOO «Binom-Press», 2010.
12. Gmurman, V. E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika*. 12nd ed. M.: Vyssh. obr., 2006.
13. Corder, Gregory W., and Dale I. Foreman. *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach*. New York: Wiley, 2009.
14. Tsybakov, Alexandre B. *Introduction to Nonparametric Estimation*. Springer, 2008.
15. Greenwood, Priscilla E., and Michael S. Nikulin. *A guide to chi-squared testing*. Wiley-Interscience, 1996.
16. Bagdonavicius, V. B., and M. S. Nikulin. “Chi-square goodness-of-fit test for right censored data.” *International Journal of Applied Mathematics and Statistics* 24.SI-11A (2011): 30–50.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.
Received: February 27, 2023.

RESEARCH OF MODELS AND METHODS FOR ROUTING AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS MOVEMENT BY UNMANNED TRANSPORT SYSTEMS FOR CARGO DELIVERY

A. S. Kostin, N. N. Maiorov

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

Modern challenges in the field of transport logistics associated with the need to increase the speed of cargo transportation and reduce the cost of transportation require the development of solutions that will allow the introduction of unmanned vehicles to solve logistics problems. Within the framework of this paper, a new problem of routing an unmanned transport system through delivery points using annealing simulation methods and an ant colony algorithm is considered. These methods are chosen taking into account the real situation of complication of the conditions of possible delivery, the emergence of closed areas for delivery, obtaining a large number of points for delivery, or the emergence of other features. The selected algorithms are relatively simple to implement and, at the same time, form acceptable routes of movement, taking into account the initial data. These algorithms are studied in the software simulation environment Gazebo for the possibility of their application in unmanned transport systems and their effectiveness in constructing alternative traffic routes. In the software simulation, a program code for the autonomous movement of an unmanned vehicle is developed and a simulation environment is formed taking into account the test data. In the test environment, the results of the ant colony algorithm are checked against the test data, and special attention is paid to the study of the speed and accuracy of the selected algorithms. It is worth noting that the annealing simulation algorithm allows you to quickly optimize a given route, however, to obtain more accurate results, you should additionally use other optimization methods, such as the ant colony algorithm. As a result of the proposed methods application, it is concluded that it is possible to form the optimal route of movement relative to the initial data within the length of the path and the speed of the generated route.

Keywords: simulated annealing method, ant colony algorithm, unmanned transport system, Gazebo simulation environment.

For citation:

Kostin, Anton S., and Nikolai N. Maiorov. "Research of models and methods for routing and practical implementation of autonomous movement by unmanned transport systems for cargo delivery." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.

УДК 656.072

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ВЫПОЛНЕНИЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ

А. С. Костин, Н. Н. Майоров

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

Темой исследования являются современные тенденции в сфере транспортной логистики, связанные с потребностью в росте скорости грузоперевозок и снижением их стоимости, требующие проработки решений, которые позволят внедрить беспилотные транспортные средства для решения задач логистики. В работе рассмотрена новая задача маршрутизации беспилотной транспортной системы по точкам

доставки с применением методов имитации отжига и муравьиного алгоритма. Данные методы были выбраны с учетом реальной ситуации усложнения условий возможной доставки, появления закрытых зон для доставки, получения большого количества точек для доставки или возникновения других особенностей. Выбранные алгоритмы относительно просты в реализации и при этом формируют допустимые маршруты движения с учетом исходных данных. Данные алгоритмы исследованы в программной симуляционной среде Gazebo на предмет возможности их применения в беспилотных транспортных системах и их эффективности при построении альтернативных маршрутов движения. В программной симуляции разработан программный код автономного движения беспилотной транспортной и сформирована имитационная среда с учетом тестовых данных. В тестовой среде выполнена проверка результатов работы муравьиного алгоритма относительно тестовых данных, особое внимание уделено исследованию скорости работы и точности выбранных алгоритмов. Следует отметить, что алгоритм имитации отжига позволяет выполнить быструю оптимизацию заданного маршрута, однако для получения более точных результатов необходимо дополнительно применять другие оптимизационные методы (например, муравьиный алгоритм). В результате применения предложенных методов сделан вывод о том, что удалось сформировать оптимальный маршрут движения относительно исходных данных в рамках длины пути и установить скорости его прохождения.

Ключевые слова: метод имитации отжига, муравьиный алгоритм, беспилотная транспортная система, имитационная среда Gazebo.

Для цитирования:

Костин А. С. Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.

Введение (Introduction)

Современные задачи логистики и управление цепей поставок требуют разработки и внедрения алгоритмов и методов маршрутизации беспилотными транспортными системами различного типа, в том числе морскими и воздушными [1], [2] с учетом существующих моделей управления. Уже сейчас прорабатываются точечные решения для маршрутизации беспилотных транспортных систем. Например, в 2015 г. компания DHL сообщила, что успешно доставила медицинские препараты и другие товары, являющиеся срочными, на небольшой остров на севере Германии с помощью дронов. 20 сентября беспилотное судно BBC BT-440 разработки и производства предприятия АО «НПП «Радар ММС», совершило первую в России коммерческую доставку. Груз для заказчика: ООО «Газпромнефть-Снабжение», массой 80 кг был доставлен на участок Восточно-Мессояхского месторождения из поселка Тазовский (Ямало-Ненецкий автономный округ) [1], [3]. Беспилотное судно с грузом по заданной траектории прошло более 120 км до точки посадки, груз был доставлен и беспилотник вернулся в точку взлета в поселке Тазовский, преодолев еще более 120 км. Движение в одну сторону, выполняемое на высоте порядка 200 м с учетом взлета и посадки, составило менее 1,5 ч, при этом дрон двигался со скоростью около 100 км/ч. Таким образом, был совершен успешный пилотный проект в данной области.

В рамках направления исследования беспилотных транспортных систем был выполнен сбор и анализ наукометрических данных при помощи программы VOSviewer. Данное программное обеспечение позволяет систематизировать и упорядочить ключевые слова в специальные *смысловые кластеры*, отражающие интерес к выбранной тематике за указанный период времени, а также построить наукометрическую картину в той или иной отрасли. В данном программном обеспечении были построены связи по ключевым словам относительно области поиска в сфере беспилотных транспортных систем (рис. 1).

На основе полученного графика связей можно сделать вывод о том, что наиболее важными в данной области исследованиями является разработка беспилотных транспортных систем, исследования в области логистики и доставки грузов при помощи беспилотных транспортных систем, машинное обучение и автоматизация, а также вопросы связи нескольких беспилотных транспортных систем [3], [5].

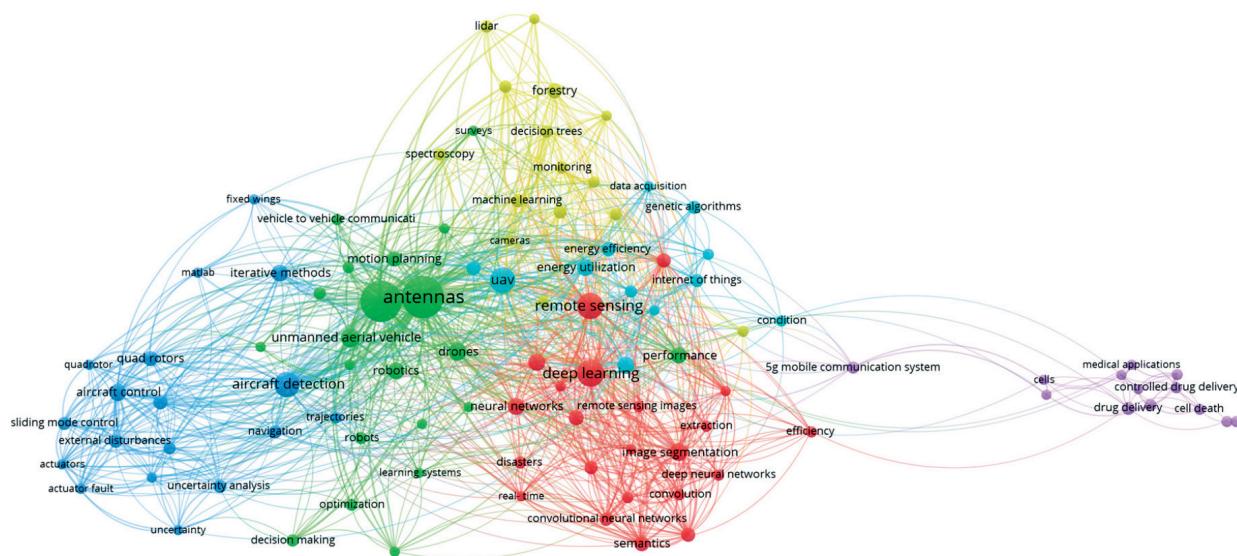


Рис. 1. Режим Network Visualization в VOSviewer

На рис. 2 показаны темпы доставки грузов при помощи беспилотных систем в 2019–2021 гг.

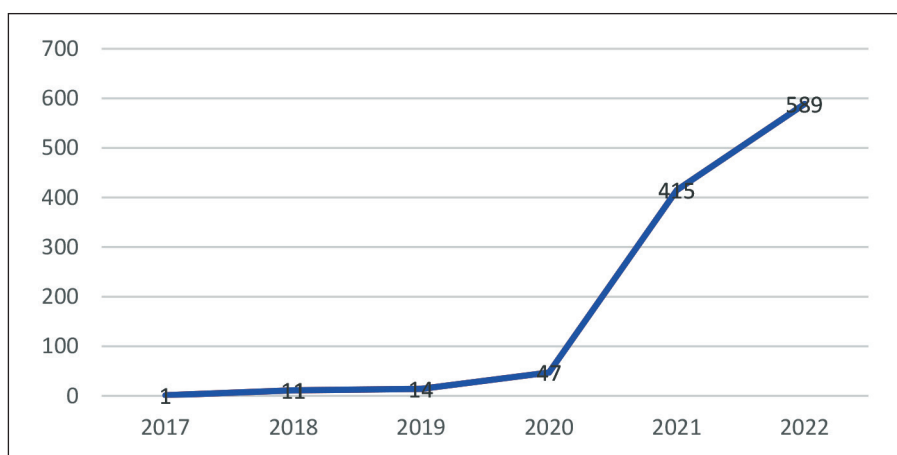


Рис. 2. Темпы роста доставки грузов при помощи использования беспилотных транспортных систем

В таблице приведены данные роста запросов по беспилотным транспортным системам за 2017–2022 гг.:

Год	Количество
2017	1
2018	11
2019	14
2020	47
2021	415
2022	589

Успешность выполнения задачи доставки грузов беспилотными транспортными системами напрямую зависит от проработки задачи маршрутизации, анализа аппаратных и приборных комплексов беспилотных систем. Данная задача особенно актуальная в ходе доставки грузов для мегаполисов. В условиях плотной городской застройки и увеличения числа автомобилей и транспортных

средств на дорогах доставка мелких посылок беспилотниками выглядит все более привлекательной. Аналогичную модельную ситуацию можно построить для морских транспортных систем. Однако существует ряд ограничений, который необходимо учитывать при выполнении миссий по доставке различных грузов. В данной работе представлено исследование вариантов маршрутизации при помощи различных алгоритмов на основе теории графов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследуя организацию маршрутизации беспилотных транспортных систем на микроуровне, можно обнаружить то, что данная задача не прорабатывается должным образом. Оператор в ручном режиме указывает точки доставки грузов без должного использования оптимизационных алгоритмов на основе дальности доставки из стартовой точки в конечную (рис. 3).

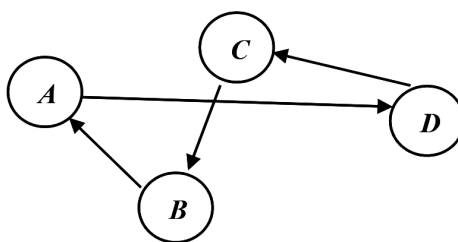


Рис. 3. Пример выполнения доставки грузов беспилотной транспортной системой

В целом задачу организации доставки грузов можно представить в виде графовой модели [4], где есть стартовая точка и точки доставки, в которые беспилотная транспортная система должна попасть, а затем вернуться в стартовую точку для зарядки аккумуляторной батареи и сбора новых грузов. Для решения задачи в случае небольшого количества точек для доставки грузов можно использовать «жадные» оптимизационные алгоритмы (например, алгоритм Дейкстры). За счет его простоты и скорости работы возможно рассчитать допустимый маршрут движения, однако в случае решения задачи с большим количеством точек доставки и большим количеством связей между точками следует рассмотреть другие оптимизационные алгоритмы (например, *метод имитации отжига*, или *муравьиный алгоритм* [6]–[8]). Далее рассмотрим их более подробно.

Метод имитации отжига — это вероятностный метод глобальной оптимизации функций. В анализе данных он известен как популярный метод обучения нейронных сетей, используемый как альтернатива градиентному спуску, которому он уступает в точности, но при этом имеет более высокую скорость сходимости.

Название метода произошло из технологии отжига металла, которая заключается в разогреве и последующем контролируемом охлаждении материала с целью уменьшения дефектов его кристаллической структуры. При нагреве металла его внутренняя энергия возрастает до определенного значения, соответствующего начальному состоянию нейронной сети. При медленном охлаждении (отжиге) с плавным уменьшением температуры тепловые колебания узлов кристаллической решетки около состояния минимума энергии будут плавно уменьшаться, в результате решетка получит более высокую упорядоченность, а энергия системы достигнет глобального минимума. Медленное уменьшение температуры можно интерпретировать как уменьшение вероятности выбора неудачных шагов в пространстве решений. На каждом шаге алгоритм случайным образом выбирает решение, близкое к текущему, оценивает его качество, а затем определяет необходимость либо перехода к нему, либо нахождения в текущем состоянии.

Алгоритм состоит в следующем. Имеет место функция F , которая на основе предыдущего состояния порождает новое, в которое система может перейти или его отбросить. Обозначим его s_c .

1. Прежде всего нужно задать начальное состояние системы. Для этого выбирается любое случайное состояние и задаются начальное и конечное значения температуры t_n, t_k . Далее на каждом k -м шаге $\Delta E = E(s_c) - E(s_{i-1})$.

2. Случайным образом генерируем новое состояние, при котором распределение вероятности должно зависеть от текущего состояния и текущей температуры:

$$s_c = F(s_{i-1}). \quad (1)$$

3. Вычисляем значение функции для сгенерированной точки

$$\Delta E = E(s_c) - E(s_{i-1}). \quad (2)$$

4. Принимаем или не принимаем сгенерированное состояние в качестве текущего. Вероятность этого решения должна зависеть от разности функций сгенерированного и текущего состояний, а также от температуры (чем выше температура, тем больше вероятность принять состояние хуже текущего). Если $\Delta E > 0$, $P(\Delta E) = 100e^{-\Delta E/t_i}$, иначе $s_i = s_c$.

5. Если новое состояние не принято, то генерируем другое, повторяя действия пп. 3, если принято, то переходим к следующей итерации, понизив температуру, $t_k = t_c \cdot \alpha$, где α — коэффициент снижения температуры.

Процесс прекращается при достижении определенной температуры. Это свидетельствует о том, что вещество остыло в точке с минимальной энергией. После завершения выводится результат работы алгоритма. Данный алгоритм позволяет решить проблему с попаданием в локальный минимум функции, но из-за вероятностного характера дает приближенное нахождение глобального минимума, хотя по сравнению с другими вероятностными алгоритмами процесс происходит достаточно быстро и не требует больших вычислительных ресурсов. Далее рассмотрим муравьиный алгоритм.

Муравьиные алгоритмы представляют собой вероятностную жадную эвристику, когда вероятности устанавливаются на основе информации о качестве решения, полученной из предыдущих решений. Идея муравьиного алгоритма состоит в моделировании поведения муравьев, связанного с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. При своем движении муравей метит путь феромоном — веществом, которое служит своеобразной «информацией», используемой другими муравьями для выбора пути. Это элементарное правило поведения и определяет способность муравьев находить новый путь в случае, если старый оказался недоступным. Очевидная положительная обратная связь быстро приведет к тому, что кратчайший путь станет единственным маршрутом движения большинства муравьев. Моделирование испарения феромона — отрицательной обратной связи — гарантирует, что найденное локально оптимальное решение не будет единственным — муравьи будут искать и другие пути. При моделировании такого поведения на некотором графе, ребра которого представляют собой возможные пути перемещения муравьев в течение определенного периода времени, наиболее обогащенный феромоном путь по ребрам этого графа будет являться решением задачи, полученным с помощью *муравьиного алгоритма*.

Пусть муравей находится в узле i , а узел j — это один из узлов S_i , доступных для перехода. Обозначим вес ребра, соединяющего узлы i и j , как $w_{i,j}$, а интенсивность феромона на нем — как $t_{i,j}$. Тогда вероятность перехода муравья из i в j составит

$$P_{i,j} = \frac{t_{ij}^\alpha + \frac{1}{w_{ij}^\beta}}{\sum_{l \in S_i} \left(t_{ij}^\alpha + \frac{1}{w_{ij}^\beta} \right)}, \quad (3)$$

где α, β — регулируемые параметры, определяющие важность составляющих (веса ребра и уровня феромонов) при выборе пути.

После того как муравей успешно проходит маршрут, он оставляет на всех пройденных ребрах след, обратно пропорциональный длине пройденного пути:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \frac{k}{L}, (ij) \in P \\ 0, (ij) \notin P \end{cases}, \quad (4)$$

где L — длина пути;

k — регулируемый параметр.

Кроме того, следы феромона испаряются, т. е. интенсивность феромона на всех ребрах уменьшается на каждой итерации алгоритма. Таким образом, в конце каждой итерации необходимо обновить значения интенсивностей:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \tau_{ij,k}(t). \quad (5)$$

Далее следует рассмотреть и сравнить алгоритмы поиска оптимального пути доставки грузов беспилотной транспортной системы.

Результаты исследования (Results of the Research)

В рамках решения данной задачи был построен граф, состоящий из 35 точек, причем из любой точки можно попасть в другую, расстояние между точками 1 м, по оси X расположено пять меток, по оси Y — семь. Доставка во все точки осуществляется из нулевой точки с координатами 0,0. В рамках данной задачи был реализован программный код на основе метода имитации отжига и муравьиного алгоритма. Затем был реализован программный код навигации беспилотной транспортной системы по полю Аркус-маркеров, расположенных согласно конфигурации точек доставки [9]–[12]. Для успешной навигации дрона необходимо просчитать перемещение дрона по данным точкам.

Исходя из того, что в задаче даны координаты точек, в данном случае необходимо вычислять расстояния между двумя точками по формуле

$$z_{ij} = \sqrt{(x_{i0} - x_{i1})^2 + (y_{i0} - y_{i1})^2}. \quad (6)$$

После этого выполнялись вычисления маршрута движения.

Рассмотрим сначала реализацию метода имитации отжига:

while t_start > t_stop:

y = []

x = []

new_dist = 0

while True:

first_index = randint(1, (len(point) — 2))

second_index = randint(1, (len(point) — 2))

if first_index != second_index:

break

first_elem = new_point[first_index]

second_elem = new_point[second_index]

new_point[first_index] = second_elem

new_point[second_index] = first_elem

for i in range(len(new_point)-1):

dist2 = dist[(new_point[i])-1][(new_point[i + 1])-1]

new_dist = new_dist + dist2

p = 100 * math.e ** (—((start_dist — new_dist) / t_start))

rand = randint(1, 100)

В данном фрагменте исходного кода на языке Python приведена реализация выбора случайных точек с дальнейшей их заменой. Для работы данного алгоритма были заданы минимальные и максимальные температуры, максимальная разница между полученным и лучшим решением на предыдущем шаге, а также заданы точки перемещения и матрица расстояний согласно условию задания (рис. 4 и 5).

Исходные данные задания:

```
Начальные точки перемещения:
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 1]
Начальная длина маршрута:
61.529999999999994
```

Рис. 4. Начальные условия перемещения

Начальный график перемещения:

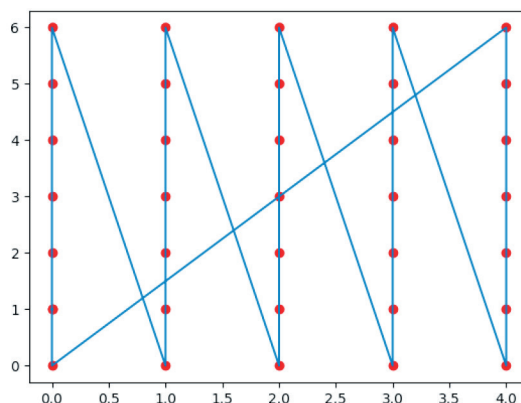


Рис. 5. Изначальный маршрут перемещения

В результате выполнения программного кода были получены следующие результаты (рис. 6 и 7):

```
Метод имитации отжига, итоговое расстояние: 41.300000000000004
Точки перемещения:
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 20, 13, 12, 11, 10, 9, 16, 17, 18, 19, 26, 32, 31, 23, 24, 33, 34, 35, 28, 27, 25, 22, 29, 30, 15, 8, 1]
```

Рис. 6. Вывод в терминал результата работы метода имитации отжига

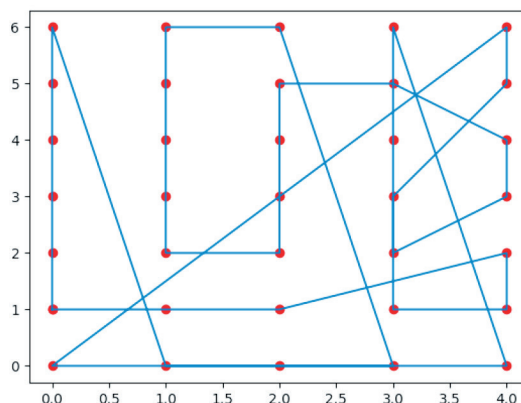


Рис. 7. Маршрут перемещения
при помощи алгоритма имитации отжига

Данный алгоритм позволяет достаточно быстро найти допустимый маршрут с выполнением оптимизации исходных данных. Далее рассмотрим реализацию муравьиного алгоритма. В данном алгоритме были введены переменные, отвечающие за количество итераций поиска маршрутов (му-

равьи), коэффициенты феромона, коэффициент испарения, степени влияния феромонов и исходные данные, аналогичные алгоритму метода имитации отжига.

Фрагмент программного кода:

```
def graph(k):
    global kNach
    x = [(XCoord[kNach], XCoord[k])]
    y = [(YCoord[kNach], YCoord[k])]
    plt.plot(x, y, color = 'red')
    kNach = k
    x = np.array([])
    y = np.array([])

def PPerehoda(k, TownList):
    global Summa
    for i in range(len(TownList)):
        r = int(TownList[i])
        if k!= r:
            Summa = Summa + ((pow(Feramonus[k][r], Alfa)) * (pow((Const/RastBtw[k][r]), Beta)))
    for i in range(len(TownList)):
        r = int(TownList[i])
        if k!= r:
            PMove[k][r] = ((pow(Feramonus[k][r], Alfa)) * (pow((Const/RastBtw[k][r]), Beta))) / Summa
```

В приведенном фрагменте программного кода выполняется расчет испарения феромона в зависимости от пройденного маршрута (городов) [8]–[11]. Если один из маршрутов был использован, то тогда коэффициент феромона увеличивается, вместе с этим растет вероятность повторного выбора данного маршрута, иначе данный маршрут постепенно будет угасать. Также в данном фрагменте программного кода строятся предварительные графики построения маршрута беспилотной транспортной системы для визуализации работы алгоритма. Результаты работы программы приведены на рис. 8 и 9.

```
Муравьиный алгоритм
минимальное расстояние:
35.414 на маршруте:
[ 0.  7. 14. 21. 28. 29. 30. 23. 22. 15.  8.  9. 16. 17. 24. 31. 32. 25.
18. 19. 26. 33. 34. 27. 20. 13.  6.  5. 12. 11.  4.  3. 10.  2.  1.]
```

Рис. 8. Вывод в терминал результата работы муравьиного алгоритма

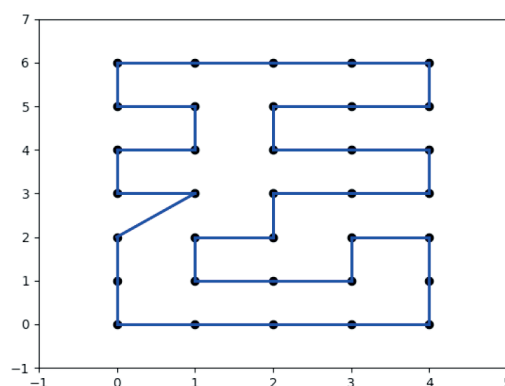


Рис. 9. Результат построения маршрута перемещения при помощи муравьиного алгоритма

В результате программной реализации оба алгоритма помогли оптимизировать маршрут доставки грузов беспилотной транспортной системой, имея при этом каждый свои особенности.

Обсуждение (Discussion)

В рамках решения задачи доставки грузов в небольшое количество точек для доставки грузов можно использовать «жадные» оптимизационные алгоритмы (например, алгоритм Дейкстры), однако в данном примере приведен сложный граф с большим количеством точек, при этом из любой одной точки можно попасть в любую другую, что накладывает свои особенности, поэтому были выбраны метод имитации отжига и муравьиный алгоритм для решения транспортной задачи.

Метод имитации отжига показал свою относительную простоту с точки зрения программной реализации, а также с точки зрения требований к ресурсам ЭВМ, однако, из-за особенностей поиска допустимого маршрута движения, данный алгоритм обладает низкой сходимостью. В данном случае было выполнено три запуска оптимизационного алгоритма и в качестве примера показан лучший результат. Оставшиеся два запуска показали результат, приведенный на рис. 10.

```
Метод имитации отжига, итоговое расстояние: 48.730000000000004
Точки перемещения:
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 9, 8, 15, 16, 29, 22, 23, 24, 18, 19, 13, 14, 21, 20, 12, 11, 27, 34, 35, 28, 25, 30, 31, 32, 33, 26, 17, 1]
Метод имитации отжига, итоговое расстояние: 47.33
Точки перемещения:
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 11, 10, 9, 8, 15, 22, 23, 16, 17, 24, 25, 20, 21, 14, 13, 19, 26, 27, 28, 35, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 18, 1]
```

Рис. 10. Результат работы метода имитации отжига
после нескольких запусков

Муравьиный алгоритм, напротив, показал высокую сходимость результатов и сумел найти лучший маршрут движения беспилотной транспортной системы, однако время выполнения поиска маршрута было довольно продолжительным. Обладая относительно простым математическим описанием, тем не менее программная реализация оказалась достаточно сложной из-за применения подхода поиска оптимального маршрута несколькими «муравьями», а также пересчета вероятностей движения по старым маршрутам исходя из коэффициента испарения феромона. Для ускорения работы оптимизации, возможно, следует скомбинировать алгоритмы поиска. Несмотря на то, что метод имитации отжига обладает низкой сходимостью, однако решение обычно находится близко к экстремуму функции, а муравьиный алгоритм позволит оптимизировать полученное решение в течение короткого периода времени для беспилотных транспортных систем.

Результаты (Results)

Представленные алгоритмы позволяют оптимизировать время и маршрут доставки грузов за счет сокращения общего объема пути. Для проверки эффективности данных операций был реализован программный код автономного движения беспилотной транспортной системы в симуляционной среде Gazebo с созданием тестового поля, соответствующего условиям данной задачи. Среда симуляции позволяет запускать и отлаживать программы автономного движения, используя большинство функций, доступных на реальном дроне, без риска повреждения оборудования. Такой подход позволяет оперативно вносить изменения в программный код, проверять его корректность и улучшать качество.

Под автономным управлением беспилотной транспортной системы подразумевается выполнение поставленной миссии без участия оператора (пилота). Навигация беспилотной транспортной системы базируется на технологии машинного зрения и поле Агисо-маркеров. Камера считывает изображение, находит на нем Агисо-маркеры (рис. 11), каждый из которых имеет свой уникальный идентификатор и опираясь на эту информацию, беспилотная транспортная система позиционирует себя в пространстве.



Рис. 11. Поле Aruco-маркеров

В памяти беспилотной транспортной системы указано расположение всех маркеров согласно условиям задания и возможно выполнение анализа лучшего полученного результата при помощи муравьиного алгоритма относительно исходных данных. Результаты сравнения представлены на скриншотах (рис. 12):

```
clover@clover-dev:~$ /bin/python3 /home/clover/Desktop/1.py
Время выполнения полета в симуляционной среде с применением муравьиного алгоритма:
0:03:20.805222
clover@clover-dev:~$ /bin/python3 /home/clover/Desktop/1.py
Время выполнения полета в симуляционной среде без применения оптимизационных алгоритмов:
0:03:38.562681
```

Рис. 12. Результаты работы программы

Фрагмент программного кода:

```
def navigate_wait(x=0, y=0, z=1, yaw=float('nan'), speed=0.5, frame_id='', auto_arm=False,
tolerance=0.2):
    navigate(x=x, y=y, z=z, yaw=yaw, speed=speed, frame_id=frame_id, auto_arm=auto_arm)
    while not rospy.is_shutdown():
        telem = get_telemetry(frame_id='navigate_target')
        if math.sqrt(telem.x ** 2 + telem.y ** 2 + telem.z ** 2) < tolerance:
            break
        rospy.sleep(0.2)
    navigate(x=0, y=0, z=1, frame_id='body', auto_arm=True)
    rospy.sleep(3)
    points=
    [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,0]
    new_points = [7, 14, 15, 22, 21, 28, 29, 30, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 27, 20, 13, 6, 5, 4, 11, 12, 19, 26, 25,
    18, 17, 16, 9, 10, 3, 2, 1, 8, 0]
```

В данном фрагменте программного кода приведен пример функции навигации беспилотной системы с применением id Aruco-маркеров. В данном случае это точки, которые должно посетить беспилотное транспортное средство. После выполнения программного кода в терминал выводится итоговое время движения беспилотной транспортной системы по всем указанным координатам. В зависимости от сложности транспортной миссии и разницы в расстояниях между точками доставки разница между исходными данными и оптимизированным маршрутом будет увеличиваться. Данные алгоритмы возможно применять также для беспилотных морских судов. В дальнейшем данную задачу можно усложнить, добавляя запрещенные маршруты движения, которые будут динамически появляться по мере выполнения автономного задания по доставке грузов беспилотными транспортными системами по заданным координатам. В данной работе были продемонстрированы методы оптимизации и показана их важность для внедрения в беспилотные транспортные системы.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования моделей и методов маршрутизации беспилотных транспортных систем можно сделать следующие выводы:

1. Сфера беспилотных транспортных систем в последние годы активно развивается, что отражается в наукометрическом исследовании при помощи программного обеспечения VOSviewer. В работах, посвященных глобальной теме изучения беспилотных транспортных систем, выполнены также и другие важные исследования, связанные с навигацией подобных систем, работой машинного зрения, элементов искусственного интеллекта и особенностями организации связи между группой беспилотных систем.

2. В настоящее время проводятся испытания данных систем в сфере транспортной логистики, однако следует рассматривать оптимизационные алгоритмы, которые позволяют дополнительно сократить время доставки грузов, сэкономить аккумуляторные батареи, а также построить оптимальный маршрут с учетом ограничительных мер.

3. Для оптимизации исходного маршрута движения были рассмотрены метод имитации отжига и муравьиный алгоритм, которые позволили оптимизировать путь беспилотной транспортной системы. Данные алгоритмы были реализованы на языке программирования Python с построением графика нового маршрута движения. Наиболее точным оказался муравьиный алгоритм. В дальнейшем полученный вариант был проверен на оптимальность в симуляционной среде Gazebo.

4. Для имитации доставки грузов в множество точек был сформирован тестовый полигон с размещением опорных точек — Агисо-маркеров, к которым должна добраться беспилотная транспортная система и выполнить доставку груза. Для реализации данной задачи был реализован программный код автономного перемещения и выполнено сравнение двух маршрутов: исходного и оптимизированного по времени выполнения доставки. Исходя из полученных результатов муравьиный алгоритм позволил построить более короткий и быстрый маршрут движения беспилотной транспортной системы. В случае расширения задачи, добавления закрытых зон данный алгоритм позволит построить допустимый маршрут движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин А. С. Эксплуатация беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Т. Ю. Карпова. — СПб.: ГУАП, 2021. — 169 с.
2. Kostin A. S. Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone / A. S. Kostin // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE, 2021. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
3. Костин А. С. Вопросы современного развития рынка беспилотных летательных аппаратов / А. С. Костин, Н. В. Богатов // Системный анализ и логистика. — 2019. — № 4 (22). — С. 65–72.
4. Прокушев Л. А. Дискретная математика / Л. А. Прокушев. — СПб.: ГУАП, 2000. — 80 с.
5. Gonzalez-R P. L. Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning / P. L. Gonzalez-R, D. Canca, J. L. Andrade-Pineda, M. Calle, J. M. Leon-Blanco // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2020. — Vol. 114. — Pp. 657–680. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.030.
6. Костин А. С. Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 7. — С. 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615497 Российская Федерация. Программа автономного полета беспилотной авиационной системы для реализации многоадресной доставки грузов / Н. Н. Майоров, А. С. Костин, Е. А. Вознесенский; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — № 2022615305; заявл. 31.03.2022; опубл. 31.03.2022.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612873 Российская Федерация. Программа формирования допустимого маршрута перемещения задачи коммивояжера на основе муравьиного алгоритма / Н. Н. Майоров, А. С. Костин, Д. В. Кучко; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — № 2023611992; заявл. 08.02.2023; опубл. 08.02.2023.

9. Engel J. Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing / J. Engel, J. Sturm, D. Cremers // *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*. Vilamoura, Algarve, Portugal. — 2012. — Pp. 43–48.
10. Drexel M. Synchronization in vehicle routing — a survey of VRPs with multiple synchronization constraints / M. Drexel // *Transportation Science*. — 2012. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 297–316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.
11. Kim J. Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft / J. Kim, M. S. Kang, S. Park // *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009*. — Springer Netherlands, 2010. — Pp. 9–26. DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.
12. Outay F. Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges / F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan // *Transportation research part A: policy and practice*. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.

REFERENCES

1. Kostin, A. S., N. N. Maiorov, and T. Yu. Karpova. *Ekspluatatsiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem*. SPb.: GUAP, 2021.
2. Kostin, A. S. “Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone.” *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
3. Kostin, Anton Sergeevich, and Nikita Vladimirovich Bogatov. “Questions of modern development of the drones aircraft market.” *Sistemnyi analiz i logistika* 4(22) (2019): 65–72.
4. Prokushev, L. A. *Diskretnaya matematika*. SPb.: GUAP, 2000.
5. Gonzalez-R, Pedro L., David Canca, Jose L. Andrade-Pineda, Marcos Calle, and Jose M. Leon-Blanco. “Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 114 (2020): 657–680. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.030.
6. Kostin, Anton Sergeyevich, and Nikolai Nikolaevich Maiorov. “Development of automated solutions for the research of delivery route options in the joint use of a vehicle and an unmanned aerial system within the boundaries of the city.” *Izvestiya Tula State University* 7 (2022): 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
7. Maiorov, N. N., A. S. Kostin, and E. A. Voznesenskii. RU 2022615497. Programma avtonomnogo poleta bespilotnoi aviatsionnoi sistemy dlya realizatsii mnogoadresnoi dostavki грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 31 March 2022.
8. Maiorov, N. N., A. S. Kostin, and D. V. Kuchko. RU 2023612873. Programma formirovaniya dopustimogo marshruta peremeshcheniya zadachi kommivoyazhera na osnove murav'inoogo algoritma. Russian Federation, assignee. Publ. 8 Feb. 2023.
9. Engel, Jakob, Jurgen Sturm, and Daniel Cremers. “Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing.” *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*. 2012. 43–48.
10. Drexel, Michael. “Synchronization in vehicle routing — a survey of VRPs with multiple synchronization constraints.” *Transportation Science* 46.3 (2012): 297–316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.
11. Kim, Jinhyun, Min-Sung Kang, and Sangdeok Park. “Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft.” *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009*. Springer Netherlands, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.
12. Outay, Fatma, Hanan Abdullah Mengash, and Muhammad Adnan. “Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges.” *Transportation research part A: policy and practice* 141 (2020): 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костин Антон Сергеевич — аспирант, ассистент
Научный руководитель:
Майоров Николай Николаевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kostin, Anton S. — Postgraduate, assistant
Supervisor:
Maiorov, Nikolai N.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
email: anton13258@mail.ru

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

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

*Статья поступила в редакцию 12 апреля 2023 г.
Received: April 12, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-537-548

RESEARCH OF THE MODEL FOR ASSESSING THE WORKLOAD OF PASSENGER PORT INFRASTRUCTURE USING DECISION-MAKING MODELS UNDER UNCERTAINTY

A. A. Dobrovolskaia

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

The current situation formed by the changeable influence of the external environment on the interaction of “sea passenger port — sea ferry/cruise company” systems has formulated new decision-making tasks under uncertainty to justify infrastructural changes. It is not enough for the managers of sea passenger ports and terminals to make decisions only on the basis of deterministic models. Probabilistic nature of the processes predetermines the need to form new models and methods to substantiate strategies for the sea passenger ports development. The problem field considered in the paper is topical because today due to such trends as increase in dimension of cruise and ferry vessels and changes in route networks it is necessary to solve the problem of development forecasting on the basis of scenario modeling. Modeling should be performed on the basis of new digital transport models, which take into account the peculiarities of marine ports and terminals infrastructure, and priority of berths. The digital model of “Passenger Port of St. Petersburg “Sea Façade”, developed by the author, is used in the paper and the necessity to single out separate states in the development of sea passenger ports is substantiated. The validity of singling out a set of boundary points, turning points of uncertainty of future development of a complex system of a sea passenger port or terminal, connected with the presence of bifurcation zones — “ramification” of possible ways of the port system evolution is proved. The proof of the proposed approach is presented by means of allocation of individual stages in the development of the sea passenger port of St. Petersburg. Based on the presented approach, a new model for the evolution and management of the sea passenger port system development is proposed. This model on a single assembly field reflects temporary changes in the development of the sea passenger port and analytical data on the increase or decrease in the number of berths. The presented set of transition points allows to determine the time model of the sea passenger port development. A new model of working with data for making decisions on modernization of sea passenger port infrastructure is offered. On the basis of modeling, taking into account different distribution laws (gamma distribution, Poisson distribution, normal distribution and others) the conditions for formation of the individual “fields of utility”, cones of preference and target functions are presented. For precise description of decision-making situation under uncertainty faced by the head of the sea passenger port, the choice of Savage criterion (S-criterion) is substantiated and mathematical model and criteria are given. A solution for formation of acceptable interval on the basis of Dataset utility field data on intensities of ferry and cruise lines work is given. On the basis of the experiment, the accuracy of the proposed decision-making model under uncertainty to justify the conditions on the need for modernization of infrastructure (modernization of berths) of the sea passenger port is substantiated. The presented model and results can be applied to other sea passenger ports and terminals, which determines the universality of the presented approach.

Keywords: sea passenger port, intensity of ferry lines, development forecasting, stochastic models, decision making under uncertainty, infrastructure modernization.

For citation:

Dobrovolskaia, Angelina A. “Research of the model for assessing the workload of passenger port infrastructure using decision-making models under uncertainty.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 537–548. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-537-548.

УДК 65.012.1, 656.072

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЗАГРУЖЕННОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А. А. Добровольская

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

Исследована современная ситуация, сформированная изменчивым влиянием внешней среды на взаимодействие систем «морской пассажирский порт – морская паромная / круизная компания», которая позволила сформировать новые задачи принятия решений при неопределенности по обоснованию инфраструктурных изменений. Отмечается, что руководителям морских пассажирских портов и терминалов недостаточно формировать принятие решений только на основе детерминированных моделей — вероятностный характер процессов предопределяет необходимость формирования новых моделей и методов для обоснования стратегий развития морских пассажирских портов. Актуальность рассматриваемых в статье проблем обусловлена следующими факторами: влияние увеличения размеров круизных и паромных судов, а также изменения в маршрутных сетях, позволяющие заблаговременно решать задачи прогнозирования развития на основе сценарного моделирования. Подчеркивается, что моделирование должно выполняться на основе новых цифровых транспортных моделей, учитывающих особенности инфраструктуры пассажирских портов и терминалов, а также приоритетности причалов. В статье использована разработанная для данного исследования цифровая модель АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» и обоснована необходимость выделения отдельных состояний в развитии морских пассажирских портов. Доказана обоснованность выделения набора граничных точек, переломных моментов неопределенности будущего развития сложной системы морского пассажирского порта или терминала, связанного с наличием зон бифуркации — «разветвления» возможных путей эволюции портовой системы. Доказательство предлагаемого подхода представляется при помощи выделения отдельных стадий в развитии морского пассажирского порта Санкт-Петербурга. На основе представленного подхода предложена новая модель эволюции и управления развития системы морского пассажирского порта. Данная модель на едином «сборочном поле» отражает временные изменения в развитии морского пассажирского порта и аналитические данные по увеличению / уменьшению количества причалов. Представленный набор переходных точек позволяет определить временную модель развития морского пассажирского порта. Предложена новая модель работы с данными для принятия решений по модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта. На основе широкого использования моделирования, с учетом различных законов распределения (гамма-распределение, пуассоновское распределение, нормальное и др.), представлены условия формирования отдельных «полей полезности», конусов предпочтений и целевых функций. Для точного описания ситуации принятия решений при неопределенности, возникающей перед руководителем морского пассажирского порта, обоснован выбор критерия Сэвиджа (S-критерий), приведены математическая модель и критерии. Показано решение формирования допустимого интервала на основе данных Dataset поля полезности по интенсивности работы паромных и круизных линий. На основе выполненного эксперимента обоснована точность предлагаемой модели принятия решений при неопределенности для обоснования условий по необходимости модернизации инфраструктуры (модернизации причалов) морского пассажирского порта. Представленные модель и результаты могут быть применены для других морских пассажирских портов и терминалов, что определяет универсальность представленного подхода.

Ключевые слова: морской пассажирский порт, интенсивности паромных линий, прогнозирование развития, стохастические модели, принятие решений в условиях неопределенности, модернизация инфраструктуры.

Для цитирования:

Добровольская А. А. Исследование модели оценки загруженности инфраструктуры морского пассажирского порта с помощью моделей принятия решений при неопределенности / А. А. Добровольская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 537–548. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-537-548.

Введение (Introduction)

Морские пассажирские порты и терминалы являются как центрами развития регионов, так и центрами концентрации новых моделей и методов по оценке загруженности для модернизации и прогнозирования развития инфраструктуры. Необходимо отметить, зависимость систем «морская паромная компания — морской пассажирский порт» от влияния внешней среды, геополитической ситуации и прямого влияния тенденций строительства новых типов круизных и паромных судов, новых моделей и методов обслуживания пассажиропотоков [1], [2]. Кроме того, необходимо учитывать наличие тренда на внедрение новых цифровых сервисов, логистических информационных систем как для внутренних процессов пассажирского порта, так и процессов, влияющих на развитие сервисов для пассажиров [3]. Сложность рассматриваемых процессов подтверждается тем, что исследуя взаимодействие систем «морская паромная компания – морской пассажирский

порт» как целостной системы, состоящей из совокупности динамически связанных структурных элементов, следует учитывать их *иерархическую взаимосвязь*, значимость которой усиливается при декомпозиции системы, а также влияние внутренних и внешних условий на результативность ее функционирования, что приводит к двум аспектам изучения системы: как на макроуровне, так и микроуровнях. Изменение отдельных процессов или отдельная инфраструктурная модернизация морского пассажирского порта может привести к повышенной загруженности последующих элементов. Необходимо отметить взаимное влияние морских пассажирских портов друг на друга в регионах морей, наличие конкуренции за пассажиропотоки и сопутствующие грузопотоки [4], [5]. В связи с этим для руководителей морских портов и терминалов с большей частотой возникают задачи принятия решений в условиях неопределенности [6], обусловленные необходимостью работы с большим набором разнородных данных.

Каждый морской пассажирский порт развивается как сложная система по своей собственной траектории развития с учетом уникального влияния региональных и геополитических факторов. Для каждого морского пассажирского порта можно определить отдельные стадии в развитии и сформировать выделение отдельных критических точек, в период формирования новых инфраструктурных изменений, обеспечивающих изменение позиции порта в регионе, увеличение числа причалов и увеличение загруженности работы.

Отдельная стадия развития морского порта соответствует фиксации определенной инфраструктуры морского пассажирского порта на выбранном временном интервале. Применительно к морским пассажирским портам как сложным системам можно применить следующие трактовки:

- состояние морского пассажирского порта — это фиксация значений параметров работы портовой системы на определённый момент времени;
- поведение системы (стратегии работы и позиционирования) — это определенные закономерности перехода морской портовой системы из одного состояния в другое, определяемые как взаимодействием с внешней средой, так и целями самой системы, внутренними изменениями;
- развитие, эволюция морского пассажирского порта — это закономерное изменение портовой системы во времени, при котором может меняться не только ее структура, но и поведение на рынке морских пассажирских перевозок, модель, стратегия продвижения.

Применительно к морским пассажирским портам оправдано применение *синергетического подхода*. Поясним данное положение на следующих примерах. Согласно принципу *спонтанного возникновения* И. Пригожина [7] в сложных системах, к которым можно отнести систему морского пассажирского порта, возможны особые критические состояния, когда малейшие колебания или отклонения в работе могут внезапно привести к появлению новых структур, полностью отличающихся от заданных. Ввиду развития и усложнения системы можно применить *принцип несовместимости* Л. Заде [8], [9], когда при росте сложности системы уменьшается возможность ее точного описания вплоть до некоторого порога. Данное положение полностью соответствует стадиям развития морского пассажирского порта. В отношении изменений морского пассажирского порта можно отметить, что с позиций системного многокритериального анализа развитие такой сложной системы многовариантно и альтернативно, а также существует «спектр» или группа путей ее эволюции. В этом случае некоторый переломный момент неопределенности будущего развития сложной системы морского пассажирского порта или терминала связан с наличием зон бифуркации — «разветвления» возможных путей эволюции портовой системы.

Рассмотрим стадии развития Морского пассажирского порта Санкт-Петербург (ныне АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад»), который был связан регулярным сообщением с портами Западной Европы (в частности, с Лондоном), начиная с 20-х гг. XX в. [10], [11].

Первая стадия развития порта связана с тем, что в г. Ленинграде исторически пассажирские суда швартовались у набережной Лейтенанта Шмидта и Английской набережной. В 1930-е гг. был построен новый морской вокзал, который находился на набережной Лейтенанта Шмидта. В 1963 г. был открыт первый морской вокзал в гавани на Васильевском острове, соответствующий всем требованиям времени по обработке судов и пассажиропотоку.

Вторая стадия определяется тем фактом, что от внешней среды поступает запрос на обработку более крупных круизных судов, а также тем, что в 1977–1982 гг. недалеко от Галерной гавани, на площади Морской славы на Васильевском острове, было возведено новое здание Морского вокзала. Для круизных судов потребовалось углубление канала до Морского вокзала. Для адаптации переходного процесса пассажирские суда «А. Пушкин», «М. Лермонтов» швартовались тогда на причале № 7 морского грузового порта, в пакгаузе которого временно размещался пассажирский морской вокзал. Кроме того, суда швартовались у грузовых причалов Морского порта Санкт-Петербург № 29, 30, 32 и 34.

Третья стадия заключалась в активной работе «Морского вокзала», где с начала 1980-х гг. круизные и паромные суда смогли швартоваться на Васильевском острове.

Четвертая стадия заключалась в переходе к строительству, работе нового специализированного морского пассажирского порта АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» и концентрация системы управления морским паромными и круизными перевозками [11].

Рассмотренные стадии представлены на рис. 1.

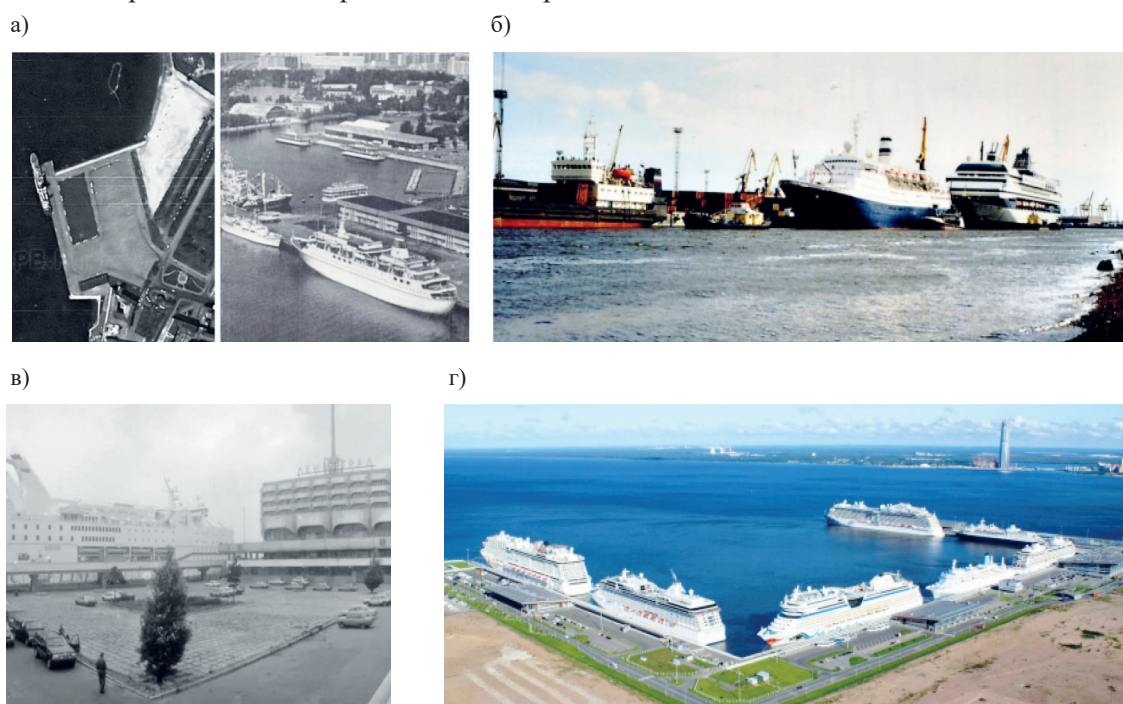


Рис. 1. Выделение отдельных состояний развития системы «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад»: а — I стадия; б — II стадия; в — III стадия; г — IV стадия

Таким образом, ранее изложенное формирует необходимость разработки новых моделей и методов принятия решений по модернизации инфраструктуры морских пассажирских портов, которые с большей точностью позволят сформировать обоснованный выбор стратегии развития в ситуации неопределенности. Для достижения данного результата необходима разработка цифровых моделей морских пассажирских портов, разработка алгоритмов анализа данных и формирования системы принятия решений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье [12] рассматриваются современные тренды, оказывающие влияние на морские пассажирские порты, которые вызывают необходимость модернизации портовой инфраструктуры. В работах [12]–[14] приведены примеры конкретных инфраструктурных решений. На основе ретроспективного анализа АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» можно построить следующую модель, которая объединяет в себе как варианты выбора различных стратегий

развития, так и числовые значения по увеличению количества причалов и интенсивности их работы и изменению позиции в регионе моря. Модель изменения системы морского пассажирского порта с учетом влияния внешней среды приведена на рис. 2. Каждая выделенная стадия работы морского пассажирского порта характеризуется отдельной маршрутной паромной или круизной сетью региона моря, которую для системного представления необходимо представлять в виде диаграмм интенсивностей Circos [13].

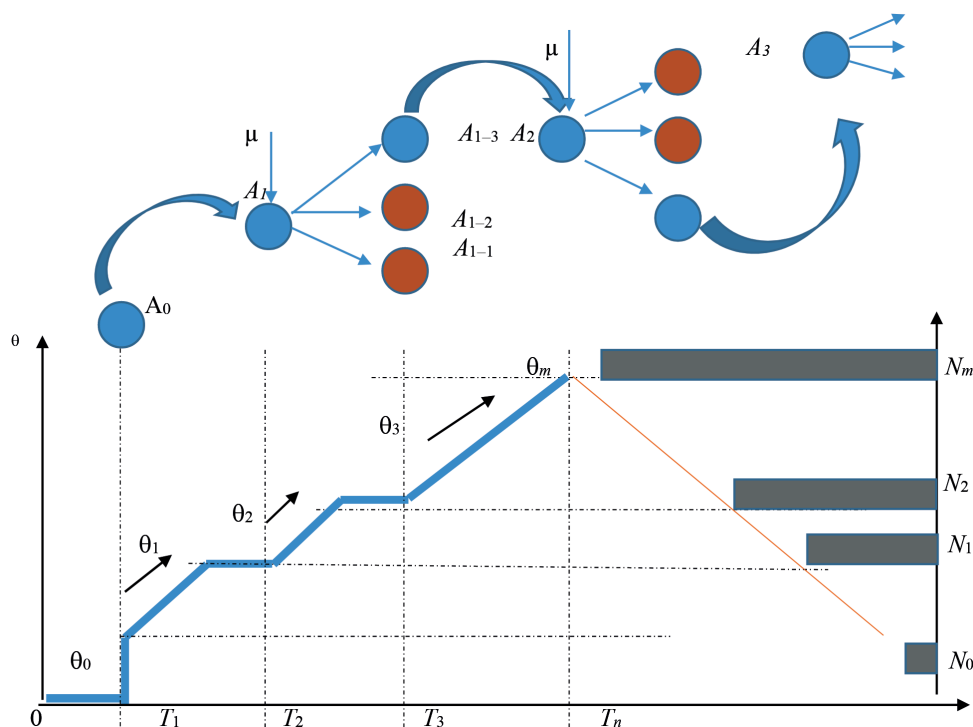


Рис. 2. Модель эволюции и управления развития морского пассажирского порта

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения: T_i — моменты времени фиксации отдельных состояний морского пассажирского порта; $A_0, A_1, A_2, \dots$ — новые состояния развития (стадии развития) морского пассажирского порта; $A_{1-1}, A_{1-2}, \dots$ — альтернативные варианты развития порта, которые не получили развития; θ_i — развитие системы морского пассажирского порта как график увеличения пассажиропотока и интенсивности работы с чередованием стабильных временных этапов развития и работы терминала; N_i — возрастающий уровень сложности инфраструктуры морского пассажирского порта, увеличение количества причалов и выделение специализированных причалов под крупные круизные и паромные суда; μ — источник влияния внешней среды вызывающий изменения.

Анализ интенсивности работы АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» приведен на рис. 3.

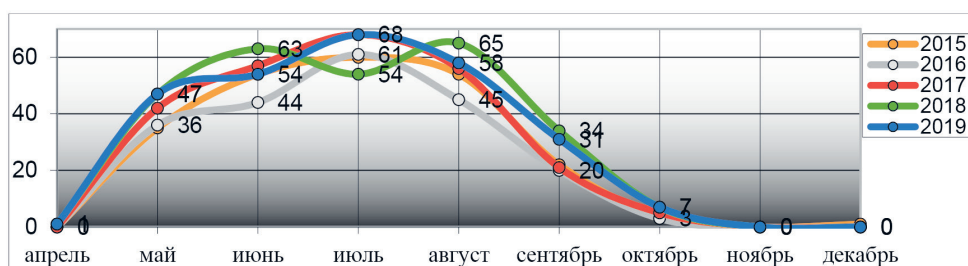


Рис. 3. Интенсивность заходов круизных и паромных судов в АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» в 2015–2019 гг.

Модернизация морского пассажирского порта должна быть обоснована, при этом необходимо одновременное использование моделей принятия решений при неопределенности и моделей моделирования на основе систем массового обслуживания. Руководитель порта оперирует имеющейся у него интенсивностью работы за прошлые периоды, в то время как для оценки различных сценариев прогнозирования необходимо создать определенное количество гипотез и выполнить последующее моделирование сценариев. Для решения формирования системы принятия решений по модернизации инфраструктуры предлагается следующая модель (рис. 4).



Рис. 4. Модель работы с данными для принятия решений по модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта

Результат моделирования различного сценария работы определяется как отдельное состояние, отдельная точка в общем поле полезности. С позиций принятия решений при неопределенности, ввиду отсутствия точных прогнозных данных, выберем в качестве базового критерий Сэвиджа [6]. Данный критерий характеризуется крайней осторожной (пессимистической) позицией отношения руководителя к возможным потерям в системе из-за отсутствия достоверных сведений о том, какая из ситуаций, влияющих на экономический результат, будет иметь место в конкретном дискретном случае. Данный критерий, в отличие от других, к примеру, Лапласа, Гурвица и других, наиболее точно описывает ситуацию принятия решений при неопределенности, которая возникает перед руководителем морского пассажирского порта.

Для выполнения исследования принимаем, что для этого критерия характерна пессимистическая позиция лица, принимающего решение к возможным состояниям (некоторым потерям) из-за недостатка информации. Для решения данным критерием реализуется матрица рисков и матрица потерь L . Сначала определяется условное решение X_y , которое соответствует утопическому решению в поле полезностей из различных модельных интенсивностей работы морского порта. Затем матрица потерь L_{ij} строится по потерям относительно утопического решения X_y (по каждому решению для каждой возможной ситуации). При анализе матрицы потерь за основу принимаются самые неблагоприятные варианты развития для морского пассажирского порта для каждого из доступных решений по всем ситуациям, не зависящим от руководителя (или лица принимающего решение). Наиболее приемлемым результатом выбирается наименее рискованная стратегия из всех возможных. Функция, задающая семейство линий уровня, выглядит следующим образом:

$$f(u; v; \dots; z) = \max \{a_{y1} - u; a_{y2} - v; \dots; a_{ym} - z\}, \quad (1)$$

Исходя из этого можно формализовать задачу нахождения наилучшего решения. Пусть i — вариант возможного решения руководителя ($i = 1, 2, \dots, m$); j — вариант возможной ситуации

($j = 1, 2, \dots, m$) состояния порта; a_{ij} — доход руководителя, если будет принято решение i -я, а ситуация сложится j -я; $A = (a_{ij})$ — матрица полезностей всех вариантов работы морского пассажирского порта; $L = (l_{ij})$ — соответствующая матрица потерь или рисков. Целевая функция критерия в данном случае имеет следующий вид:

$$Z_s = \min_i \{K_i\}, \quad (2)$$

где $K_i = \max_j \{l_{ij}\}$; $l_{ij} = \max_i \{a_{ij}\} - a_{ij}$

Для оценки различных интенсивностей работы морских паромных линий и исследования различных вариантов загруженности причалов выполним имитационное моделирование, используя следующие распределения: гамма-распределение, пуассоновское распределение, нормальное распределение и др. При моделировании будем считать общее количество паромных (круизных) судов за навигацию.

Результаты исследования (Results of the research)

Для выполнения моделирования различных сценариев работы морского пассажирского порта была разработана цифровая транспортная модель морского пассажирского порта в среде Anylogic [15]–[17]. Исходными данными была выбрана интенсивность работы АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» в течение периода навигации до 2019 г. Для каждого вида распределения входного потока было проведено 50 экспериментов в цифровой транспортной модели в среде AnyLogic [15]. Ожидаемое входное значение потока задается, по данным 2019 г., для морского пассажирского порта — 265 судов в год. Результаты исследования приведены в таблице.

Результаты модельных экспериментов различной интенсивности круизных и паромных судов

№ п/п.	Гамма	Пуассоновское	Нормальное	№ п/п.	Гамма	Пуассоновское	Нормальное
1	247	263	249	1	264	317	266
2	289	221	240	2	262	295	257
3	240	269	242	3	315	274	252
4	297	273	264	4	273	291	275
5	280	320	284	5	257	299	280
№ п/п.	Гамма	Пуассоновское	Нормальное	№ п/п.	Гамма	Пуассоновское	Нормальное
6	261	221	290	11	295	277	240
7	259	249	263	12	279	276	256
8	308	265	248	13	271	257	267
9	269	264	358	14	265	266	274
10	281	234	356	15	270	269	272

На основе полученных значений интенсивностей работы круизных или паромных линий сформируем поле полезности для каждого варианта (рис. 5).

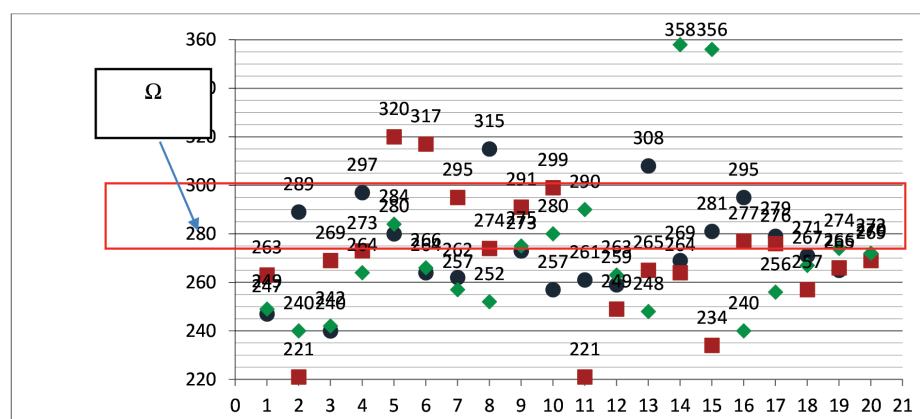


Рис. 5. Формирование поля полезности для принятия решений при неопределенности и перехода к исследованию по критерию Сэвиджа

На рис. 5 символом Ω обозначена некоторая изменяемая лицом принимающим решение область выборки, определяющая интервал допустимых значений интенсивности загрузки морского порта. Для каждой выбираемой области формируются УТ (утопическая точка, точка с наилучшим результатом) и АУТ (антиутопическая точка — точка с наихудшим результатом). Результаты исследования по критерию Сэвиджа (S -критерий) приведены на рис. 6.

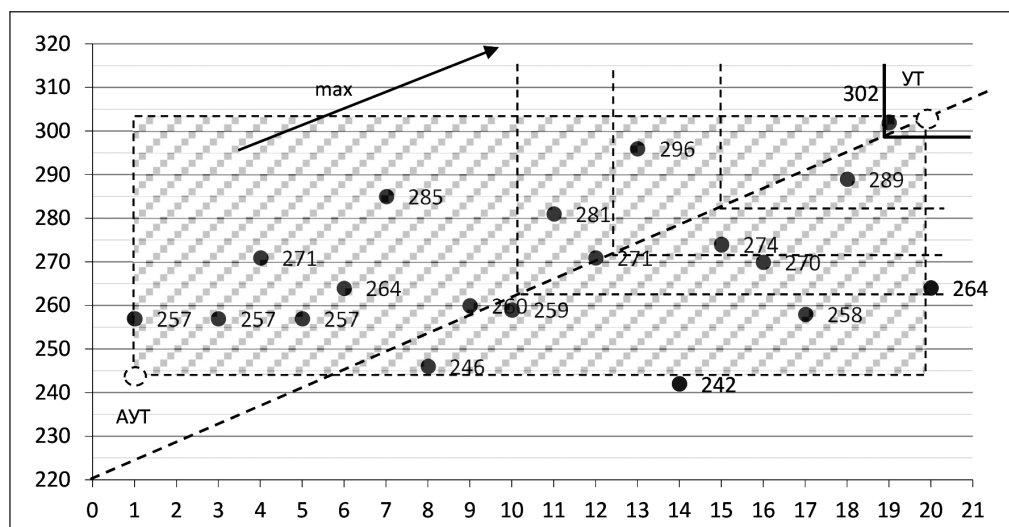


Рис. 6. Уточнение параметров интенсивностей загрузки морского пассажирского порта для принятия решений по модернизации:
max — параметр, формирующий направление предпочтения,
соответствующего выбору наибольшего количества посещений круизных и паромных судов;
-- — линии уровня S -критерия

Особенностью предлагаемой модели является работа с динамическими данными (например, использование данных от беспилотных авиационных систем [18]), для точной реализации имитационной цифровой модели морского порта. Цифровая модель морского порта должна иметь возможность моделировать различные сценарии работы интенсивностей круизных и паромных судов, выполнять моделирования с учетом приоритетов судов и причалов по обработке. По мере перемещения линии уровня формируется набор интенсивностей работы морского пассажирского порта, каждый из которых определяет прогнозируемое состояние порта. На основе анализа представленных данных можно сделать вывод о том, что следование S -критерию позволяет сформировать переход на увеличение обработки до 302 круизных и паромных судов для выбранного порта. При увеличении данного значения необходимо строительство дополнительных новых причалов.

Обсуждение (Discussion)

Современная ситуация в сфере морских паромных и круизных перевозок характеризуется как постепенным восстановлением пассажиропотоков после ограничений, вызванных как эпидемией Covid – 19, так и активным переходом индустрии к строительству больших лайнеров и формированием новых маршрутов в регионах морей. Инфраструктура морских пассажирских портов должна соответствовать современным требованиям для возможности приемки регионом больших круизных судов и сохранения пассажиропотока. Кроме того, морские паромные и круизные компании для достижения докризисных уровней и привлечения пассажиропотока будут активно создавать новые маршруты. Поэтому система морского пассажирского порта должна оперативно реагировать в ситуации конкуренции за пассажиропоток, создавая условия либо для модернизации существующих причалов, либо для строительства новых.

Характерным примером формирования ответа на внешний вызов и влияния тренда на увеличение габарита круизных судов является тот факт, что ввиду увеличения длины судна бо-

лее 330 м АО «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад» успешно выполнил проект строительства выносных палов, тем самым увеличив длину причалов № 6 и № 7 (причального фронта) на 108,6 м. В данном случае морской пассажирской порт стратегически реализовал возможность приема крупных морских лайнеров, а Санкт-Петербург создал новую систему круизных и паромных маршрутов. Однако ввиду динамического влияния внешней среды, точность детерминированных моделей для реализации задач прогнозирования развития снижается. На первое место выходит сценарное моделирование различных интенсивностей круизных и паромных судов с учетом введения приоритетности причалов для конкретных типов и размеров судов. Набор вариантов моделирования формирует группу значений, для которых необходимо применять модели принятия решений при неопределенности, а также S -критерии, позволяющие определить набор целевых значений, которые должна достигнуть система морского пассажирского порта.

Представленные в статье модель и метод анализа позволяют на качественно новом уровне обосновать целевые параметры работы порта и инфраструктурные изменения. Кроме того, формируется допустимый интервал значений работы морского пассажирского порта, который обеспечит *оптимальную эффективность*. Предлагаемое решение отличается более оптимальной функциональностью в отличие от дискретных моделей.

Представленный анализ принятия решений при неопределенности на основе собранных данных по маршрутным направлениям сформировал набор данных Dataset, который необходимо использовать для исследования инфраструктуры и формирования обоснованных предложений по модернизации. Полученные данные за счет использования цифровой модели морского пассажирского порта позволяют исследовать различные сценарии и интенсивности, что обеспечивает получение полного набора данных.

Результаты (Results)

Представленная в исследовании модель принятия решения при неопределенности и модель работы с данными позволяют обосновать модернизацию инфраструктуры пассажирского порта (например, количество причалов) для увеличения интенсивности работы, а также привлечения новых паромных и круизных линий. Для этого на основе цифровой модели морского пассажирского порта формируются различные модельные сценарии, формирующие набор данных «поля полезности». При выполнении исследования в модели учитывалось решение задачи формирования приоритетности причалов для определенных типов круизных и паромных судов. Выполненное исследование основано на расписании судозаходов и использовании различных параметров загрузки причалов.

Для построения цифровой транспортной модели предлагается использование динамических данных (например, от беспилотных авиационных систем), на основе которых строится пространственная модель для последующего использования в имитационной программной среде AnyLogic. Данное предложение позволяет обеспечить гибкость работы с модельными данными и повысить точность результатов моделирования.

Для формирования стратегии по модернизации был выбран S -критерий, так как он позволяет точно описать ситуацию наличия ограниченности информации по интенсивностям работы круизных и паромных линий. Дополнительно при перемещении конуса предпочтений открывается возможность выделения некоторого допустимого интервала, который обеспечит наилучшую ожидаемую интенсивность работы морского пассажирского порта по приему круизных и паромных судов.

Эталонными для исследования и проверки предлагаемой модели были данные АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад», интенсивность которых была исследована за различные годы. Полученные результаты подтвердили необходимость выполнения модернизации причалов и их реализации для данного порта, что подтвердило эффективность предложенной модели.

Предлагаемую 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 перехода на новую стадию развития.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнено раскрытие и фиксация понятия «отдельного состояния» морского пассажирского порта как сложной технической системы, предложена новая модель исследования изменений.
2. Несмотря на методическую сложность анализа данных представленный подход к прогнозированию развития морских пассажирских портов как исследование набора связанных определенных выбранных состояний является эффективным, что обеспечивает формирование полного набора данных и определение зон бифуркации системы.
3. Системно представлены основные вызовы со стороны внешней среды, общества и паромных компаний, которые являются источником формирования новых требований по модернизации инфраструктуры.
4. Для доказательства точности и применимости предлагаемого нового метода для других морских пассажирских портов в качестве эталонного исследования выполнено выделение отдельных стадий развития для АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» (выполнен системный ретроспективный анализ).
5. Предложена общая модель эволюции и изменения состояния морского пассажирского порта, объединяющая как данные по увеличению инфраструктуры порта, так и формирование условий влияния внешней среды и выделение зон бифуркации.
6. Адекватность предложенной модели работы с данными для принятия решений по модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта с включением принятия решений при неопределенности доказана математически и проверена на принятых эталонных значениях.
7. Модель с обоснованием использования S -критерия как наиболее подходящего для описания ситуации принятия решения со стороны руководителя морского пассажирского порта определением «поля полезности» и набором утопических и антиутопических значений работы морского пассажирского порта может быть рекомендована для практического использования.
8. На основе полученных модельных данных интенсивней судозаходов круизных и паромных линий сформированы новые DataSet для представления «полей полезности» и сформированы конусы предпочтения как для формирования отдельных целевых значений в развитии порта, так и достоверных интервалов.
9. Сформированные данные на основе предлагаемой модели необходимо использовать при решении группы вопросов прогнозирования развития, выбора стратегии продвижения морского пассажирского порта в регионе моря.
10. При использовании предложенной модели не требуется проводить исследования достоверности (достаточной репрезентативности количества испытаний).
11. Результаты анализа необходимо использовать при исследовании операционной загруженности наземной инфраструктуры морского пассажирского порта и определять максимальные уровни загруженности применительно к конкретным морским терминалам, формировать системы принятия решений при неопределенности модернизация инфраструктуры для изменения положения порта в регионе в сфере морских пассажирских перевозок.

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. 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.
3. 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.

4. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. 2023 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 22.03.2023).
5. Baltic LINes: Shipping in the Baltic Sea — Past, present and future developments relevant for Maritime Spatial Planning. Project Report I. — 2016. — 35 p.
6. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности / Г. Л. Бродецкий. — М.: Academia, 2010. — 336 с.
7. Волкова В. Н. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. — 2-е изд. — М.: Юрайт, 2014. — 616 с.
8. Ильясов Б. Г. Основы теории систем и системного анализа: учебное пособие / Б. Г. Ильясов; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. — Уфа: РИК УГАТУ, 2016. — 217 с.
9. Паладич Л. Грузопассажирские суда / Л. Паладич // Морской флот. — 1990. — № 9. — С. 28–30.
10. Калиниченко И. Не нужен им берег российский // Коммерсантъ [Электронный ресурс] / И. Калиниченко. — Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/883731> (дата обращения: 02.03.2023).
11. АО «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portspb.ru/> (дата обращения: 15.02.2023).
12. 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.
13. Майоров Н. Н. Исследование работы морских пассажирских терминалов на основе диаграмм связей / Н. Н. Майоров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 1. — С. 119–126. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-119-126.
14. Воевудский Е. Н. Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов / Е. Н. Воевудский, М. Я. Постан. — М.: Транспорт, 1987. — 318 с.
15. AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 15.02.2023).
16. 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.
17. Liu Y. Cruise tourism for sustainability: An exploration of value chain in Shenzhen Shekou port / Y. Liu, E. Dong, S. Li, X. Jie // Sustainability. — 2020. — Vol. 12. — Is. 7. — Pp. 3054. DOI: 10.3390/su12073054.
18. 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. *Morskie kruizy: teoriya i praktika*. M.: Sovetskii sport, 2012.
2. 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
3. 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.
4. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. Web. 22 March 2023 <<https://cruisemarketwatch.com/growth/>>.
5. Baltic LINes: Shipping in the Baltic Sea — Past, present and future developments relevant for Maritime Spatial Planning. Project Report I. 2016.
6. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybore v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.
7. Volkova, V. N., and A. A. Denisov. *Teoriya sistem i sistemnyy analiz*. M.: YUrajt, 2014.
8. Il'yasov, B. G. *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza*. Ufa: RIK UGATU, 2016.
9. Paladich, L. “Gruzopassazhirskie suda.” *Morskoi flot* 9 (1990): 28–30.
10. Kalinichenko, I. “Ne nuzhen im bereg rossiiskii.” *Kommersant*. Web. 3 March 2023 <<https://www.kommersant.ru/doc/883731>>.
11. Passenger Port of Saint-Petersburg “Marine Façade”. Web. 2 Apr. 2023 <<https://www.portspb.ru/>>.

12. 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 admiral S. O. Makarova* 14.2 (2022): 169–180. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-169-180.
13. Maiorov, Nikolai N. "Research of functioning of maritime passenger terminals with application of mind maps." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2019): 119–126. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-119-126.
14. Voevudskii, E. N., and M. Ya. Postan. *Stokhasticheskie modeli v proektirovanii i upravlenii deyatel'nost'yu portov*. M.: Transport, 1987.
15. AnyLogic. Web. 15 Feb. 2023 <<https://www.anylogic.ru>>.
16. 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.
17. Liu, Yanhong, Erwei Dong, Shiqi Li, and Xiaowen Jie. "Cruise tourism for sustainability: An exploration of value chain in Shenzhen Shekou Port." *Sustainability* 12.7 (2020): 3054. DOI: 10.3390/su12073054.
18. Maiorov, Nikolai Nikolaevich, Angelina Alexandrovna Dobrovolskaia, and Vitaly Evgenievich 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

Добровольская 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

Dobrovolskaia, 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 20 апреля 2023 г.
Received: April 20, 2023.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 15. № 3

2023 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.23. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 27,75. Тираж 500 экз. Заказ № 377/23

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7