

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 18. № 2

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026**



Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2026. — Т. 18. — № 2. — 194 с.

ISSN 2309-5180 (print)

ISSN 2500-0551 (online)

«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.

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С. О. Макарова»**

Адрес учредителя и издателя

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

Адрес редакции

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

e-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова, 2026

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

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** 171

Реуцкий А. С., Ольховик Е. О. Использование данных автоматической идентификационной системы для определения углеродного следа от судоходства 171

Астреин В. В., Кондратьев С. И., Филатов В. И. Ситуационная осведомленность: от парадигмы «обработки данных» к парадигме «управления восприятием» 190

Галин А. В., Гольдинов Д. В. Разработка модели для оптимизации планировки открытых складских площадок портов Северного морского пути 204

Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Тындыкарь Л. Н. Анализ методов вибродиагностики для механизмов подъемно-транспортного оборудования 216

Ююкин И. В. Моделирование траектории движения судна сплайнами Лагранжева типа 232

Штанько А. Н. Формирование набора береговых ориентиров для систем визуального позиционирования судна при резервировании систем спутниковой навигации 250

Богословский Ю. В., Кириченко А. В. Анализ взаимодействия участников процесса снабжения флота судоходной компании с использованием графической нотации BPMN 261

Гарибин П. А., Кабанов С. А. Синтез оптимального управления безэкипажным судном при маневрировании в сложных навигационных условиях 272

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)** 284

Галиев И. Р., Новиков Д. С., Тхет Хлаинг Мьо Влияние формы камеры сгорания на газодинамические характеристики воздушного вихря 284

Кожухарь Е. Д., Рубан А. Р. Влияние непровара на циклическую долговечность сварных соединений корпусных конструкций судов 297

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-54734 от 17 июля 2013 года

Подписка на журнал осуществляется онлайн на сайте «Урал-Пресс»
www.ural-press.ru/catalog/98131/8994732 (подписной индекс — 37276)

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

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

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

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

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

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. Макианов,
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.

<i>Чанчиков В. А., Гужвенко И. Н., Прямухина М. С. Исследование противоизносных свойств модифицированных смазочных материалов в условиях, моделирующих цилиндропоршневую группу судового дизеля</i>	<i>306</i>
<i>Огай С. А., Ле Ч. Т. Обновление моделей коррозии морских судов на основе байесовского вывода с использованием Гамильтоновского метода Монте-Карло.....</i>	<i>318</i>

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ..... 335

<i>Лаута О. С., Куракин А. С., Крамской Н. Н. Подход к управлению уязвимостями в морских портах.....</i>	<i>335</i>
--	------------

<i>Буцанец А. А., Беспалов А. П., Жидкова А. М. Разработка состава компонентов системы автоматического управления морских автономных надводных судов с учетом внешних воздействий.....</i>	<i>346</i>
--	------------

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 171

Reutskii A. S., Ol'khovik E. O. Using automatic identification system data
to determine the carbon footprint of shipping..... 171

Astrein V. V., Kondratiev S. I., Filatov V. I. Situational awareness:
from a data processing paradigm to a perception management paradigm..... 190

Galin A. V., Goldinov D. V. Model development for optimization
of the layout of open storage areas of northern sea route ports 204

Zub I. V., Ezhov Yu. E., Tyndykar L. N. Analysis of vibration diagnostic
methods for mechanisms of lifting and transport equipment..... 216

Yuyukin I. V. Modeling of a ship trajectory using lagrange-type splines 232

Shtanko A. N. Formation of a set of coastal landmarks for ship visual
positioning systems under satellite navigation system redundancy..... 250

Bogoslovskiy Y. V., Kirichenko A. V. Analysis of interaction of participants
in the fleet supply process of a shipping company using BPMN
graphical notation..... 261

Garibin P. A., Kabanov S. A. Synthesis of optimal control
for an unmanned vessel during maneuvering in complex navigational
conditions..... 272

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 284

Galiev I. R., Novikov D. S., Thet. Hlaing Myo Influence of combustion
chamber shape on the gas-dynamic characteristics of air swirl 284

Kozhukhar E. D., Ruban A. R. Influence of lack of fusion on the fatigue
life of welded joints in ship hull structures..... 297

Chanchikov V. A., Guzhvenko I. N., Pryamukhina M. S. Research
of the anti-wear properties of modified lubricants under conditions
simulating the cylinder-piston group of a marine diesel engine 306

Ogay S. A., Le Tr. T. Bayesian updating of corrosion models
of marine ships Hamil-tonian Monte Carlo 318

Volume 18. № 2

2026

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

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

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

**AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES AND PRODUCTIONS 335**

Lauta O. S., Kurakin A. S., Kramskoy N. N. Approach to vulnerability
management in seaports..... 335

Butsanets A. A., Bespalov A. P., Zhidkova A. M. Development
of the component composition of the automatic control system
for maritime autonomous surface ships under external disturbances 346

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189

EDN BBZEUF

УДК 629.5.018, 504.5.054, 004.9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ОТ СУДОХОДСТВА

А. С. Реуцкий¹, Е. О. Ольховик²

¹ Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

В статье выполнен комплексный анализ международных нормативных инструментов декарбонизации морского транспорта, разработанных Международной морской организацией (ИМО): Energy Efficiency Design Index, Energy Efficiency Existing Ship Index, Carbon Intensity Indicator, Energy Efficiency Operational Index и Greenhouse Gases Fuel Intensity в целях разработки методов и моделей по использованию данных автоматической идентификационной системы для определения углеродного следа от судоходства, на примере Финского залива Балтийского моря. Рассмотрены мотивационные составляющие их введения, области применения, объекты регулирования и принципы расчета. Выявлены фундаментальные ограничения существующей нормативной базы: проектный и интегральный характер индексов, ограниченная номенклатура парниковых газов, отсутствие пространственной привязки и зависимость от самодекларируемых данных. Обоснована необходимость дополнения регуляторных механизмов независимыми расчетными методиками оценки выбросов на основе данных автоматической идентификационной системы. Подробно рассмотрена модель Ship Traffic Emission Assessment Model как пример инструмента геофизического моделирования, позволяющего осуществлять непрерывный пространственно-распределенный мониторинг выбросов парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O), а также NO_x, SO_x, твердых частиц, черного углерода и летучих органических соединений. Представлены результаты разработки и апробации программного обеспечения для сбора и анализа АИС-данных в акватории Балтийского моря, включая визуализацию маршрутов и картографирование интенсивности углеродного следа. Предложена динамическая модель расчета выбросов, учитывающая географию района, сопротивление воды, ветра, волнения и льда, а также нелинейную зависимость удельного расхода топлива от нагрузки судовой энергетической установки. Сделан вывод о необходимости институционализации АИС-методик в качестве инструмента объективного контроля, верификации отчетности и обеспечения экологической безопасности на акваториях.

Ключевые слова: декарбонизация, Energy Efficiency Design Index, Energy Efficiency Existing Ship Index, Carbon Intensity Indicator, Energy Efficiency Operational Index, Greenhouse Gases Fuel Intensity, парниковые газы, автоматическая идентификационная система, Ship Traffic Emission Assessment Model, углеродный след, верификация выбросов, пространственный мониторинг.

Для цитирования:

Реуцкий А. С. Использование данных автоматической идентификационной системы для определения углеродного следа от судоходства / А. С. Реуцкий, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 171–189. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189. — EDN BBZEUF.

USING AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM DATA TO DETERMINE THE CARBON FOOTPRINT OF SHIPPING

A. S. Reutskii¹, E. O. Ol'khovik²

¹ Russian Maritime Register of Shipping, Saint Petersburg, Russian Federation

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

This paper presents a comprehensive analysis of international regulatory instruments for the decarbonisation of maritime transport developed by the International Maritime Organization (IMO), including the Energy Efficiency Design Index (EEDI), Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI), Carbon Intensity Indicator (CII), Energy Efficiency Operational Index (EEOI), and Greenhouse Gas Fuel Intensity (GFI), with the aim of developing methods and models for the use of Automatic Identification System (AIS) data to determine the carbon footprint of shipping, using the Gulf of Finland in the Baltic Sea as a case study. The study examines the drivers behind the introduction of these instruments, their scope of application, regulatory targets, and calculation principles. Fundamental limitations of the existing regulatory framework are identified, including the design-based and aggregated nature of the indices, the limited range of greenhouse gases considered, the absence of spatial attribution, and reliance on self-reported data. The necessity of supplementing regulatory mechanisms with independent computational methodologies for emission assessment based on AIS data is substantiated. Particular attention is given to the Ship Traffic Emission Assessment Model (STEAM) as an example of a geophysical modelling tool enabling continuous, spatially resolved monitoring of emissions of greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O), as well as NO_x, SO_x, particulate matter, black carbon, and volatile organic compounds. The paper presents the results of the development and validation of software for the collection and analysis of AIS data in the Baltic Sea region, including route visualisation and mapping of carbon footprint intensity. A dynamic emission calculation model is proposed, accounting for regional geographical characteristics, hydrodynamic resistance (water, wind, waves, and ice), and the nonlinear dependence of specific fuel consumption on engine load. It is concluded that AIS-based methodologies should be institutionalised as a tool for objective monitoring, verification of reporting, and ensuring environmental safety in maritime areas.

Keywords: decarbonisation, Energy Efficiency Design Index (EEDI), Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI), Carbon Intensity Indicator (CII), Energy Efficiency Operational Index (EEOI), Greenhouse Gas Fuel Intensity (GFI), greenhouse gases, Automatic Identification System (AIS), Ship Traffic Emission Assessment Model (STEAM), carbon footprint, emissions verification, spatial monitoring

For citation:

Reutskii, Aleksandr S. and E. O. Ol'khovik. "Using automatic identification system data to determine the carbon footprint of shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.2 (2026): 171–189. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189.

Введение (Introduction)

В настоящее время в рамках работы Комитета по защите морской среды (КЗМС/МЕРС) Международной морской организации (ИМО) выполняется уточнение технического задания на выполнение Пятого исследования ИМО по выбросам парниковых газов (ПГ) с судов, которое будет выполнено в 2026 г. Четвертое исследование [1] продемонстрировало, что на морской транспорт приходится около 2,9 % глобальных выбросов CO₂. Отдельно проводимые исследования и прогнозы [2] демонстрируют дальнейший рост выбросов с морского транспорта несмотря на все принимаемые ИМО меры по их снижению.

Наблюдающиеся изменения климата традиционно связывают с антропогенной деятельностью, в том числе с эксплуатацией судов. При дальнейшем неблагоприятном развитии глобального потепления в опасности окажется 20–30 % живущих видов [3]. Продолжающийся рост уровня Мирового океана, составляющий 0,2 м в период наблюдений 1901–2018 гг., ставит под угрозу существование многих населенных пунктов [4]. По этой причине внимание ученых сосредоточено на проблеме декарбонизации, целью которой является значительное снижение и впоследствии полная нейтрализация загрязнения атмосферы ПГ, содержащимися в отработавших газах судовой энергетической установки (ЭУ).

Значительные усилия ИМО по борьбе за чистоту воздуха привели к созданию комплекса мер, направленных на снижение выбросов ПГ с морских судов. Параллельно во многих странах развивается собственное законодательство, базирующееся как на международных нормах, так и на результатах собственных мониторинговых исследований [5]–[7]. И в том, и в другом случае в основе регулирующих мер и прикладных научных инструментов лежат различные методологии, отличающиеся целями, задачами, точностью, функционалом и перечнем исходных данных.

Целью данной статьи является обзор основных методик для определения выбросов от судоходства, ретроспективной и мотивационной составляющих их появления, исследование области

их применения, основных принципов, объекта применения, функций (регуляторных, прикладных, научных), а также описание используемых методологий.

Методы и материалы (Materials and methods)

1. Методики нормирования, учета и определения углеродного следа для морских судов

1. *Energy Efficiency Design Indicator (EEDI)* — представляет собой обязательный технический стандарт для новых судов валовой вместимостью более 400 GT, введенный в 2013 г. [8] и претерпевший ряд ужесточающих поправок (фаз) в 2015–2019 гг. (10 % снижение относительно базового уровня), 2020–2021 гг. (15–20 % снижение относительно базового уровня), 2022–2024 гг. (30 % снижение относительно базового уровня) [9] и после 2025 г. (30–50 % снижение относительно базового уровня) [10]. Учитываемые ПГ: CO₂, CH₄, N₂O.

Мотивационной составляющей введения EEDI являлась необходимость в переходе от реакции к превентивному планированию, т. е. вместо системы штрафов ИМО создала систему, которая направляет инвестиции и инженерное дело в нужное русло, подчеркивая необходимость сокращения выбросов начиная с самых ранних этапов жизненного цикла судна путем правильного выбора проектных решений по энергоэффективности судна. Так как во многом задача определения оптимального с точки зрения экономики и экологии судна исконно являлась одной из ключевых задач науки проектирования судов, своевременное введение EEDI позволило в очередной раз стимулировать развитие соответствующих научных направлений, а также инновации в области альтернативных топлив и энергосберегающих технологий. Временной промежуток между принятием EEDI и последующим пакетом изменений к Приложению VI МК МАРПОЛ 73/78 позволил собрать данные и выработать дальнейшую стратегию снижения выбросов и декарбонизации.

Областью применения EEDI являются судостроительная отрасль и процесс проектирование новых судов. Применяется EEDI исключительно к новым судам на этапе их проектирования, постройки и ввода в эксплуатацию: танкерам, балкерам, сухогрузам, контейнеровозам, газовозам, рефрижераторам, судам ро-ро, пассажирским (паромы, лайнеры) и грузопассажирским (паромы) судам. EEDI не применяется к судам с неконвенционной энергетической установкой (ЭУ), к судам, не выполняющим транспортную работу (буксирам, дноуглубительным судам, стоечным судам, офшорным сооружениям, военным кораблям, парусным судам), и судам, скорость которых составляет не более 4 уз.

Объектом регулирования (применения) EEDI является проектная характеристика транспортного судна, а именно количество CO₂-экв., которое судно будет выбрасывать теоретически в расчете на единицу транспортной работы. Таким образом, формальным объектом является индекс «1», а фактическими объектами являются проектные решения (форма корпуса и его сопротивление, мощность и тип ЭУ, наличие и эффективность применяемых технологий энергоэффективности (EETs), альтернативные топлива), и процесс сертификации судна.

$$EEDI_{\text{дост}} = \frac{\text{Выбросы CO}_2 \text{ от ГД и вспом. механизмов}}{\text{Грузоподъемность} \cdot \text{Скорость}}, \text{ г, CO}_2 - \text{экв} / \text{т} - \text{миля.} \quad (1)$$

Принцип регулирования EEDI [11] заключается в сравнении двух величин: достигнутого $EEDI_{\text{дост}}$ и требуемого $EEDI_{\text{т}}$. Достигнутый $EEDI_{\text{дост}}$ — это фактический показатель энергоэффективности, полученный для конкретного строящегося судна на основе его проекта и подтвержденный в ходе испытаний [12]. Требуемый $EEDI_{\text{т}}$ — это максимально допустимое значение EEDI, установленное ИМО для данного типа и размера судна.

Условие для прохождения сертификации: $EEDI_{\text{дост}} \leq EEDI_{\text{т}}$. Если судно не соответствует этому требованию, то оно не получит Международное свидетельство о достижении индекса энергоэффективности (IEEC) и не сможет выйти в международный рейс. Таким образом, EEDI представляет собой превентивный регулятор, задающий вектор развития всего мирового флота на десятилетия вперед.

2. *Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)* — представляет собой ретроактивный обязательный технический стандарт для эксплуатирующихся судов валовой вместимостью более 400 GT, построенных до вступления в силу соответствующих фаз EEDI (независимо от их возраста) и вступивший в силу 1 ноября 2022 г. путем принятия пакета поправок к Прил. VI МАРПОЛ 73/78 [13]. Является специальной мерой, необходимой для улучшения показателей экологичности существующих судов. Учитываемые ПГ: CO₂, CH₄, N₂O.

Мотивационной составляющей введения EEXI являлась необходимость устранения «бреши» в нормативном регулировании для существующих судов, требования EEDI к которым неприменимы. Введение EEDI условно разделило флот морских судов на новые суда, на которых должны быть реализованы энергоэффективные технологии и должно использоваться альтернативное топливо, и старые суда, эксплуатация которых будет продолжаться еще в течение 15–20 лет. В этой ситуации постройка новых судов стала дороже из-за необходимости соблюдения требований EEDI, и, во избежание снижения темпов строительства новых судов судовладельцами в пользу эксплуатации старых, возникла необходимость в кратчайшие сроки ввести дополнительное регулирование.

Областью применения EEXI являются существующие суда, которые подпадают под действие гл. 4 прил. VI МК МАРПОЛ 73/78, для которых фаза EEDI не действовала на момент их постройки или действовала до ужесточения требований. Применяется EEDI ко всем типам транспортных судов валовой вместимостью 400 GT и более: танкерам, балкерам, сухогрузам, контейнеровозам, газовозам, рефрижераторам, судам ро-ро, пассажирским (паромы, лайнеры) и грузопассажирским (паромы) судам. Для некоторых типов судов установлены дополнительные пороги по дедвейту. Так, для сухогрузов, рефрижераторов и газовозов дедвейтом менее 15 000 т EEXI не применяется. Так же, как и EEDI, EEXI не применяется к судам с неконвенционной энергетической установкой (ЭУ), судам, не выполняющим транспортную работу (буксирам, дноуглубительным судам, стоечным судам, оффшорным сооружениям, военным кораблям, парусным судам) и судам, чья скорость не превышает 4 уз.

Объектом регулирования (применения) EEXI является фактическая характеристика транспортного судна, а именно количество CO₂-экв., которое судно теоретически выбрасывает в расчете на единицу транспортной работы. Таким образом, формальным объектом является индекс «I», а фактическими объектами являются решения, принятые при проектировании судна (форма корпуса и его сопротивление, мощность и тип ЭУ) или при его модернизации (наличие и эффективность примененных технологий энергоэффективности (EETs), альтернативные топлива и др.), а также процесс сертификации.

Методика определения EEXI схожа с EEDI (пп. 1), основное отличие заключается в использовании фактических данных, а не проектных, как в случае с EEDI. Так, для расчета EEXI [14] принимаются фактические значения дедвейта из Свидетельства о грузовой марке судна, фактическая мощность двигателя по нанесенной на нем заводом-изготовителем маркировке, паспортный удельный расход топлива при 75 % MCR из Руководства завода-изготовителя, скорость судна определяется по результатам ходовых испытаний.

Сравнение достигнутого EEXI с требуемым производится так же, как и в случае с EEDI. При этом требуемое (Required) значение EEXI соответствует требуемому значению EEDI для нового судна в фазе 2 или 3 (в зависимости от даты расчета). Таким образом, основная цель ввода EEXI заключается в том, чтобы старое судно по своим характеристикам выбросов ПГ было не хуже, чем новое. В Руководстве по освидетельствованию и сертификации EEXI [15] дано описание процедур проверки КО и порядок оформления Свидетельства о международной энергетической эффективности (ПЕЕС).

Использование EEDI и EEXI для расчета углеродного следа затруднено ввиду того, что эти теоретические индексы не учитывают:

— реальные условия (чистая и спокойная вода, проектная загрузка судна, проектные характеристики корпуса и ЭУ);

- условия эксплуатации (не учитываются другие состояния загрузки судна, кроме полной, и другая скорость, кроме проектной, и др.);
- статический характер величин, в то время как углеродный след представляет собой динамический показатель.

Таким образом, методика исключает гибкость, т. е. возможность учета различных режимов работы ЭУ судна в рейсе и изменяющихся погодных условий.

3. *Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)* — представляет собой рекомендуемую ИМО добровольную методологию по оценке и мониторингу выбросов ПГ с судов, применяемую для эксплуатирующихся судов валовой вместимостью более 400 GT и рекомендуемую к использованию для судовладельцев [16], [17] для проведения мониторинга энергоэффективности своих судов в соответствии с разработанным SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan). При этом разработка и выполнение плана управления энергоэффективностью SEEMP является обязательным согласно п. 22 Прил. VI МК МАРПОЛ 73/78. Таким образом, несмотря на то, что EEOI не является обязательным инструментом с точки зрения предоставления отчетных материалов в Морскую администрацию и ИМО, он является одним из действенных инструментов для анализа и принятия мер в рамках выполнения и корректировки SEEMP. Учитываемые ПГ: CO₂, для газовых двигателей: CH₄, N₂O.

Мотивационной составляющей введения EEOI являлась необходимость создания методики подсчета выбросов ПГ судна в результате его операционной деятельности. EEOI представляет собой KPI для непрерывного улучшения операционной деятельности, достижение целей которого одновременно приводит к экономии топлива и получению конкурентных преимуществ в соответствии с целями судоходной компании. Помимо этого, постоянный мониторинг EEOI позволяет раньше выявлять проблемы (необоснованный рост EEOI может сигнализировать об обрастании корпуса, нецелевом использовании топлива и т. д.), принимать управленческие решения по инвестированию (например, необходимость установки EETs) и готовиться к ужесточению регулирования.

Областью применения EEOI как необязательного инструмента в рамках SEEMP являются существующие суда, которые подпадают под действие гл. 4 Прил. VI МК МАРПОЛ 73/78, однако по желанию судовладельца данная методика может применяться к любым судам. Она служит для операционного мониторинга и менеджмента, в которые входят:

- мониторинг эффективности судов (выявляет тренды в расходе топлива);
- оценка эффективности работы экипажа и принимаемых решений;
- выявление технических проблем (обрастание корпуса, нарушение работы пропульсивной системы);
- обоснование инвестиций (установка EETs) и бенчмаркинг (сравнение показателей судна со своими историческими показателями).

Кроме того, EEOI может служить в качестве коммерческого актива — выступать в качестве критерия выбора судоходной компании, гарантировать прозрачность для инвесторов и облегчить «существование» судна в районах с обязательствами по покупке квот на выбросы (EU ETS).

Объектом применения EEOI является фактическая характеристика транспортного судна, а именно количество CO₂-экв., которое судно выбросило в расчете на единицу транспортной работы за отчетный период. Методика определения EEOI схожа с EEDI и EEXI, основное отличие заключается в использовании фактических данных по расходу топлива и перевезенному грузу.

В зависимости аналитических целей уровень EEOI может быть агрегированный аналитический (группа однотипных судов компании), агрегированный стратегический (весь флот судов компании) или секторальный (сектор судоходства). Поскольку объектом является отдельное судно, корректно проводить сравнение EEOI одного и того же судна в разные периоды, а также корректно сравнивать EEOI судов с близкими характеристиками (типоразмером, типом ЭУ и пропульсивного комплекса), при этом некорректно сравнивать EEOI судов разных типоразмеров. EEOI для одного рейса определяется по формуле (2), для периода времени — по формуле (3):

$$EEOI = \frac{\sum_{\text{тип топл}} (\text{Масса топлива} \cdot \text{Переводной коэффициент топлива})}{(\text{Масса груза} \cdot \text{Расстояние})} \quad (2)$$

$$EEOI_{\text{врем. пром}} = \frac{\sum_{\text{рейс}} \sum_{\text{тип топл}} (\text{Масса топлива} \cdot \text{Переводной коэффициент топлива})}{\sum_{\text{рейс}} (\text{Масса груза} \cdot \text{Расстояние})}. \quad (3)$$

Таким образом, EEOI представляет собой методику, используемую внутри компании, при этом в ИМО разработан регуляторный инструмент на базе EEOI–СИ.

4. *Carbon Intensity Indicator (CII)* — представляет собой операционно-ориентированный инструмент декарбонизации в судоходстве. СИ — это операционный индекс, который демонстрирует насколько эффективно судно перевозило грузы или пассажиров в течение прошедшего года с точки зрения выбросов CO₂. Операционный индекс показывает, сколько CO₂ судно фактически выбрасывало в атмосферу за год при перевозке одной тонны груза на одну морскую милю. СИ представляет собой ежегодную оценку углеродоемкости работы судна, максимально схожую с EEOI.

Мотивационной составляющей введения СИ являлась необходимость в «замыкании» полученной нормативно-регуляторной «экосистемы» EEDI, EEXI — инструментом, позволяющим регулировать операционную составляющую деятельности морского транспорта и, таким образом, связать финансовые и репутационные риски с фактическими выбросами в процессе работы. Дополнительными мотивами являются «экономический» мотив, т. е. создание «зеленого фрахта», политический мотив — необходимость обеспечения публичной отчетности и прозрачности, а также технологический мотив — необходимость в цифровых инновациях.

Областью применения СИ являются существующие суда, которые подпадают под действие гл. 4, прил. VI МК МАРПОЛ 73/78. Применяется ко всем типам транспортных судов валовой вместимостью 5000 GT и более: танкерам, балкерам, сухогрузам, контейнеровозам, газовозам, рефрижераторам, судам ро-ро и пассажирским (паромы, лайнеры) и грузопассажирским (паромы) судам. Так же, как EEDI и EEXI, СИ не применяется к судам с неконвенционной энергетической установкой (ЭУ), судам, не выполняющим транспортную работу (буксирам, дноуглубительным судам, стоечным судам, офшорным сооружениям, военным кораблям, парусным судам) и несамостоятельным судам. Таким образом, область применения СИ шире, чем у EEXI, а воздействие — сильнее и постоянное, так как СИ периодически ужесточается / пересматривается.

Объектом регулирования (применения) СИ является не судно, а его фактическая углеродоемкость в эксплуатации, выраженная через годовой операционный показатель в конечный рейтинг (А–Е). Расчет СИ состоит из следующих шагов:

1) сбор данных, когда судовладелец собирает данные по фактическим расходам топлива (в тоннах) по всем типам топлива за календарный год, а также данные о пройденном расстоянии (в милях) и фактически выполненной транспортной работе (например, масса перевезенного груза в тоннах × пройденное расстояние);

2) расчет фактических выбросов CO₂ — на основе расхода топлива и коэффициентов выбросов рассчитывается общий объем выбросов CO₂ за год;

3) расчет достигнутого СИ (Attained CII) = (Общие выбросы CO₂ за год) / (Транспортная работа за год);

4) определение требуемого СИ (Required CII) — для каждого судна рассчитывается его персональный требуемый СИ на год на основе исходного значения СИ для данного типа и размера судна, а также коэффициента снижения, ужесточаемого ежегодно;

5) расчет рейтинга СИ представляет собой определение отношения достигнутого СИ к требуемому СИ, на основе которого судну присваивается рейтинг в соответствии с приведенной таблицей.

Система рейтингов СИ Carbon Intensity Indicator (CII) Rating System

Рейтинг	Описание	Операционные последствия
A	Значительно превышает требуемый стандарт	Лучший рейтинг. Судно является желанным для фрахтователей, в будущем сможет претендовать на получение премиальных единиц
B	Немного превышает требуемый стандарт	Хороший рейтинг. Судно соответствует текущим ожиданиям
C	Соответствует требуемому стандарту	Минимально допустимый рейтинг для нормальной эксплуатации
D	Немного ниже требуемого стандарта	«Желтый» уровень тревоги. Судно должно разработать План корректирующих действий
E	Значительно ниже требуемого стандарта	«Красный» уровень тревоги. Судно находится в критическом положении

Последствия получения низких рейтингов (D и E). Система СИ не просто ставит оценки, она имеет прямые юридические и коммерческие последствия. Для судна с рейтингом D в течение трех последующих лет подряд, а для судна E в течение одного года судовладельцу необходимо предоставить классификационному обществу и Администрации флага утвержденный план корректирующих действий SEEMP. В этом плане должно быть детально описано, какие конкретные меры будут приняты для улучшения рейтинга СИ до уровня C или выше.

Роль ключевых сторон в обеспечении соблюдения. Юридические последствия реализуются через несколько сторон, каждая из которых обладает своими полномочиями.

1. Администрация флага (Flag State) — главный надзорный орган для судна, обязанностью которого является необходимость убедиться в том, что суда, эксплуатирующиеся под ее флагом, соответствуют требованиям МАРПОЛ. Также Администрация проверяет и утверждает План корректирующих действий (Corrective Action Plan) и контролирует его выполнение. Если план не выполнен, Администрация флага судна аннулирует или отзывает Международное свидетельство о энергоэффективности (IEEC) судна. Без этого документа судно не может законно эксплуатироваться, так как, фактически, не выполняет требования Приложения VI МАРПОЛ.

2. Классификационное общество (Class Society) обычно действует от имени Администрации флага. Проводит аудиты, проверяет расчеты СИ и одобряет технические меры по плану корректирующих действий.

3. Администрация порта (Port State Control — PSC) реализует последствия на практике. Инспекторы PSC имеют право проверить свидетельства судна, включая IEEC и его рейтинг СИ. Если судно заходит в порт без действующего IEEC, так как оно было аннулировано за несоблюдение СИ, инспекторы PSC могут задержать судно в порту и/или выписать предписание о запрете на выход из порта до устранения нарушений. Задержание судна влечет за собой колоссальные финансовые потери: простой, штрафы, стоимость устранения нарушений, репутационный ущерб.

4. Применение СИ характеризуется каскадным эффектом, который начинается с коммерческого давления (снижение доходов. В случае если это не помогает, подключаются юридические механизмы (лишение свидетельства и задержание), которые физически останавливают бизнес. Для судовладельца плохой рейтинг СИ трансформируется из «зеленой» проблемы в проблему юридического и операционного выживания его актива.

5. *GFI (Greenhouse Gas Fuel Intensity)* — интенсивность выбросов парниковых газов от топлива — методика определения количества эквивалента диоксида углерода (CO₂), выбрасываемого на единицу энергии от морского топлива, использованного судном.

Несмотря на снижение выбросов ПГ морскими судами после введения EEDI, EEXI, СИ, Кодекса NOx и ограничения по эмиссии серы ИМО 2020, они не позволяют добиться весьма амбициозных целей ИМО. Поэтому в настоящий момент выполняется переход к системе IMO NZF,

основанной на WtW-методологии учета выбросов ПГ для оценки выбросов полного жизненного цикла для всех видов судовых топлив [18], [19].

Ключевым показателем в этой системе является индекс топливных выбросов парниковых газов (ИТВПГ — GFI), смещающий фокус регулирования с операционной эффективности судна на углеродоемкость используемого им топлива. Стандарт ИТПВГ (GFI) — это регулирование углеродоемкости топлива, применяемое к судам валовой вместимостью более 5 000.

ИТВПГ представляет собой основополагающий элемент более широкой программы ИМО по декарбонизации. При его определении используется методология WtW, учитывающая выбросы ПГ на протяжении всего жизненного цикла судового топлива (от производства и транспортировки до сжигания на борту), что создает всеобъемлющую основу для оценки соответствия [20]. Судам необходимо будет ежегодно рассчитывать значения фактической годовой интенсивности топливных выбросов ПГ, выражаемой в CO₂-экв. / МДж энергии.

$$GFI_{\text{достигн}} = \frac{\sum_{\text{тип топл}} \text{ИТВПГ}_j \cdot \text{Энергетическая ценность потр. топл.}_j}{\text{Полная потребленная судном энергия}}. \quad (4)$$

При расчете ИТВПГ учитывается количество и интенсивность выбросов за весь жизненный цикл каждого вида потребленного на судне топлива. Фактическая интенсивность выбросов ИТВПГ сравнивается с двумя значениями: целевым годовым ИТВПГ — «базовым целевым показателем» — и «целевым показателем прямого действия» (значения ежегодно ужесточаются и установлены в Правиле 35 Прил. VI МАРПОЛ 73/78 на период 2028–2035 гг., а также до 2040 г.). Таким образом, будет определяться баланс соответствия судна.

В тех случаях, когда фактическая ИТВПГ судна больше целевой ИТВПГ прямого действия, но меньше базовой ИТВПГ (так называемый *дефицит уровня 1*) или когда она больше базовой целевой ИТВПГ (так называемый *дефицит уровня 2*), судно должно компенсировать в Фонд чистых нулевых выбросов ИМО (IMO Net-Zero Fund) разницу компенсационными единицами. Стоимость компенсационных единиц на период 2028–2030 гг. установлена в Правиле 36 Прил. VI в размере 100 долл. США за тонну CO₂ эквивалента для уровня 1 и 380 долл. США за тонну CO₂ эквивалента для уровня 2.

Таким образом, все разработанные в настоящий момент нормативные инструменты ИМО по декарбонизации (EEDI, EEXI, EEOI, СП и GFI) имеют регуляторную природу и длительный период обратного действия: так, EEDI и EEXI сложно изменить в случае ужесточения требований, а СП больше характеризует операционную деятельность флота (или отдельных судов) компании, при этом результаты известны только через год фактического использования (данные в DCS за отчетный период). GFI вообще смещает фокус регулирования с судна на используемые им топлива и, очевидно, имеет дискриминационный характер по отношению к ископаемым топливам [21]. Это приводит к тому, что судам одного проекта, имеющим разный операционный профиль, присваиваются кардинально разные рейтинги СП. Для них фактическими рекомендациями в SEEMP будут требованиями к улучшению схемы эксплуатации, банальные «меньше простаивать и больше возить груз».

II. Инструменты объективного контроля выбросов в акваториях

Ключевое ограничение нормативных инструментов ИМО заложено в их природе. Они не измеряют выбросы, а рассчитывают их удельные значения на основе верифицируемых, но контролируемых заявителем данных (мощность двигателя, дедвейт, удельный расход топлива). EEOI, будучи операционным индикатором, служит инструментом управленческого учета, но не является публично верифицируемой метрикой. Перечисленные инструменты эффективны для стимулирования декарбонизации на корпоративном уровне, но принципиально не приспособлены для решения задач объективного контроля выбросов на акваториях, инвентаризации всей номенклатуры выбросов ПГ судовых энергетических установок и создания прозрачных механизмов верификации.

Восполнение указанных пробелов возможно лишь путем внедрения независимых расчетных методик, использующих данные автоматической идентификационной системы (АИС) и реа-

лизирующих обратный, независимый подход. Здесь выбросы рассчитываются экзогенно, на основе физических параметров движения судна (скорость, осадка, координаты), получаемых в режиме реального времени от АИС. Такой подход обеспечивает объективность (отсутствие конфликта интересов), непрерывность (возможность оценки каждого рейса) и пространственную привязку (картографирование выбросов).

EEDI, EEXI и СП являются интегральными показателями. Они оперируют тонно-милями, дедвейтом и суммарным расходом топлива за год или рейс. Данные инструменты принципиально не способны предоставить информацию о распределении выбросов в географическом разрезе. Это делает их непригодными в следующих случаях:

- для оценки воздействия судоходства на качество атмосферного воздуха в прибрежных зонах и портовых агломерациях;
- для контроля соблюдения зон контроля выбросов (ECA/NECA) в режиме, близком к реальному времени;
- для формирования национальных кадастров выбросов в соответствии с требованиями Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), где необходима пространственно-распределенная отчетность.

Таким образом, необходимо обратиться к существующим методикам, позволяющим оперативно отслеживать выбросы ПГ с судов. В настоящее время выполнено много исследований, позволяющих пролить свет на смягчение последствий выбросов ПГ с судов. К числу хорошо изученных направлений относятся регулирование скорости движения судов, применение различных технологий энергоэффективности (EETs), электрификация судов с берега при их стоянке в порту и переход на альтернативные топлива. Среди них снижение скорости движения судов [22] доказало свою эффективность, в то время как различные альтернативные решения по топливу демонстрируют теоретический потенциал [23], [24].

Единого способа снизить выбросы не существует и вряд ли он появится в будущем. Мировое судоходство является сферой пересечения интересов многих заинтересованных сторон, поэтому без комплексного изучения проблемы с учетом целостного понимания не только совокупных выбросов, но и их происхождения (географического, технического) невозможна выработка гармоничных, научно-обоснованных и целенаправленных мер по их сокращению.

Таким образом, в настоящее время прослеживаются следующие основные методы учета выбросов с водного транспорта: нисходящие расчеты, основанные на расходе судового топлива, и восходящие расчеты [25], основанные на данных судовой системы идентификации (AIS) [26], [27]. Обе эти методологии не лишены своих недостатков. Так, методология расчета выбросов на основе расхода топлива в значительной степени зависит от точности учета топлива на судне, а также точности коэффициентов выбросов для каждого типа топлива, принятого в методиках ИМО. К тому же учетная методология не имеет четкой географической привязки и не отражает реальное состояние судна с позиции его энергоэффективности (степень ухудшения буксировочного сопротивления из-за обрастания корпуса, эффективность использования планировщиков рейсов и другие технологии энергоэффективности).

Динамический метод, основанный на АИС, классифицирует выбросы в зависимости от различных состояний судна в рейсе, его типа и характеристик, обеспечивая высокий уровень пространственно-временной детализации. Благодаря внедрению систем навигационной информации, АИС является незаменимым источником данных об операциях судов в режиме реального времени. Частота передачи данных с других судов позволяет судам получать многочисленные записи АИС за короткий промежуток времени, что может быть использовано для получения данных о выбросах высокого качества.

Литературный обзор расчетных методов оценки выбросов морского судоходства представлен в работах [28]. Крупномасштабно их можно разделить на две модели: методы оценки, учитывающие движение судна в открытом море и методы оценки, учитывающие движение судна в морских портах. Наиболее логичный и простой подход в расчете — это точный учет потребляемого топлива,

на основе которого можно количественно оценить объемы вредных выбросов. Тип используемого судового топлива также оказывает влияние на величину углеродного следа транспортной услуги [29].

К более точным моделям относятся расчетные взаимосвязи скорости движения судна к расходу топлива, сложность которых заключается в необходимости наличия подробной информации о тактико-технических характеристиках судовой энергетической установки.

Наиболее современным и фундаментальным инструментом для расчета углеродного следа от морского судоходства является модель оценки выбросов судового трафика STEAM (Ship Traffic Emission Assessment Model) [30], [31], [32], основанная на анализе движения судна преимущественно по данным морской автоматической идентификационной системы (АИС) [33], транслируемым судами по радиосвязи.

Структура данных АИС включает:

постоянный блок данных:

- MMSI (Maritime Mobile Service Identity) — уникальный номер морской подвижной службы;
- IMO номер — номер судна от Международной морской организации (при наличии);
- название судна;
- позывной судна;
- тип судна (танкер, балкер, пассажирское и т. д.);
- габариты судна (длина и ширина) и др.;

динамический блок данных:

- положение (географические координаты);
- скорость относительно грунта (SOG);
- путевой угол (COG);
- истинный курс;
- навигационное состояние (например, «на якорю», «под движением», «ограниченная маневренность»);
- углы крена и дифферента (для класса А);
- осадка судна (draft);
- дата и время получения данных и др.;

рейсовый блок данных:

- пункт назначения (Destination);
- время прибытия (ETA — Estimated Time of Arrival);
- информация о грузе (класс / категория);
- количество людей на борту;
- сообщения безопасности (Safety Related Messages (SRM)) и др.

Для Балтийского моря данные АИС в режиме реального времени поставляются национальными морскими администрациями, например: Finnish Transport Infrastructure Agency [34], Danish Maritime Authority (DMA) [35, 36] и др.

Поскольку данные АИС можно отнести к категории BigData, т. е. в сутки количество поступающих наборов сообщений для акватории Балтийского моря превышает 1 млн позиций, для их анализа разработаны специальные фреймворки с открытой лицензией, в том числе Хельсинкская комиссия (HELCOM) — комиссия по защите морской среды Балтийского моря (Baltic Marine Environment Protection Commission) также разрабатывает открытое программное обеспечение [37] для анализа и статистики АИС-данных, расчета измеряемых параметров интенсивности и плотности судоходства [38], а также маневрирования в различных ситуациях [39] и выявления типовых ситуаций. Следует отметить, что бесплатные и открытые фреймворки для работы с данными АИС, как правило, имеют собственные функциональные ограничения и обновляются с большой временной периодичностью.

В Государственном университете морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова при поддержке РС разрабатывается программное обеспечение по сбору, анализу и визуализации

данных АИС, в том числе для акватории Балтийского моря используются как открытые данные, так и собственные приемники сигналов АИС; архивы формируются в базе данных для дальнейшей работы и проведения научных исследований. Пример визуализации расположения судов в Финском заливе с использованием разработанного программного обеспечения приведен на рис. 1.

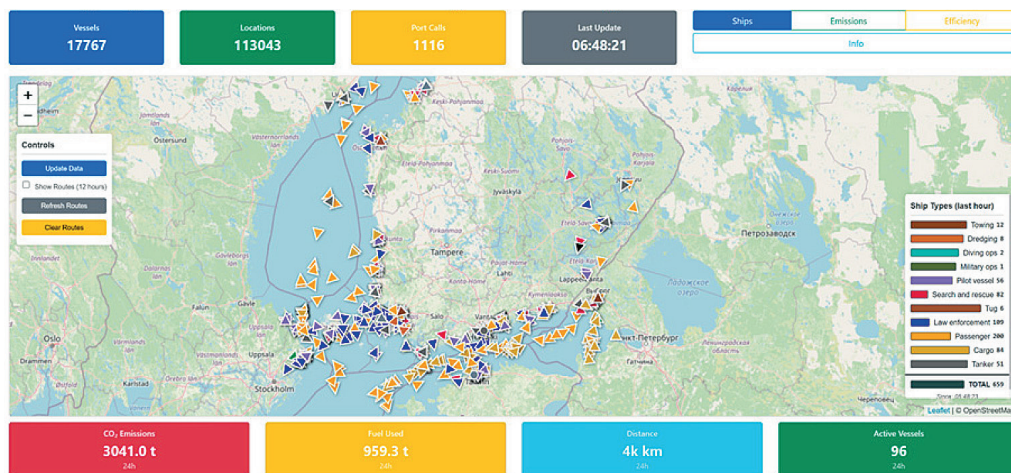


Рис. 1. Визуализация расположения судов в Финском заливе Балтийского моря (по данным АИС)
Fig. 1. Visualisation of vessel positions in the Gulf of Finland, Baltic Sea (based on AIS data)

Для оценки «углеродного следа» от судоходства используются несколько математических моделей. Простейшие основаны на учете расхода потребляемого топлива: $\text{Выбросы (кг)} = \text{Расход топлива (кг)} \cdot \text{Эмиссионный коэффициент (кг/(кг топлива))}$. Несмотря на простоту такого подхода, его применение при прогнозировании будет давать большую погрешность, поскольку расход топлива и эмиссионный коэффициент (количество CO_2 , SO_x , NO_x выделяемого при сжигании единицы топлива) динамически изменяются в достаточно широких пределах, а их взаимосвязь имеет сложный нелинейный характер и, кроме того, отсутствует точная информация о том, какое именно топливо использует судно. Например, при суточном расходе, равном 10 метрических тонн MGO, и коэффициенте выбросов $\text{CO}_2 = 3,206 \text{ т CO}_2\text{-экв/т топлива}$ (для MDO) выбросы CO_2 за сутки составляют 32 060 кг. При использовании в качестве судового топлива MDO показатели существенно не изменятся, для HFO коэффициент выбросов $\text{CO}_2 = 3,115 \text{ т CO}_2\text{-экв/т топлива}$; для LNG коэффициент выбросов $\text{CO}_2 \sim 2,750$ + дополнительные метановые выбросы (CH_4) в объеме 8,27 тонн $\text{CO}_2\text{-экв/т топлива}$. В случае, когда данные о расходе топлива недоступны, расчет может быть основан на параметрах эксплуатации судна в следующем виде: $\text{Выбросы (кг)} = \Sigma (\text{Время работы двигателя} \times \text{Нагрузка} \times \text{Удельный расход топлива} \times \text{Коэффициент CO}_2)$.

Методики семейства STEAM, напротив, изначально создавались как инструменты геофизического моделирования. Их выходными данными являются не индексы, а карты интенсивности выбросов с разрешением до сотен метров, что делает их безальтернативным инструментом для государственного экологического контроля и градостроительного планирования.

Действующая система регулирования ИМО (CII, EEDI) фокусируется на узкой номенклатуре ПГ. Модели на основе АИС, такие как STEAM, обладают модульной архитектурой, позволяющей включать расчет любых видов загрязняющих веществ при наличии валидированных эмиссионных факторов. В научной практике STEAM успешно применяется для оценки выбросов NO_x , SO_x , твердых частиц ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}), черного углерода и летучих органических соединений (ЛОС).

СИ и система сбора данных DCS (Data Collection System) ИМО основаны на самодекларации. Расход топлива определяется по судовым замерам или бухгалтерской отчетности. Данная модель уязвима для систематических ошибок и намеренных искажений, а расчетные методики на основе АИС способны выполнять функцию внешнего аудита. Сопоставление заявленного судном СИ

с расчетным СП, полученным путем моделирования на основе АИС-треков, позволяет выявлять аномалии и подтверждать достоверность отчетности. Внедрение таких механизмов становится критически важным по мере распространения рыночных мер (например, включение морского транспорта в систему торговли выбросами ЕС), где цена углерода исчисляется десятками евро за тонну CO₂.

Тогда суммарная потребляемая судном мощность судовой энергетической и вспомогательных установок составляет:

$$P_{SUM} = \mu (R_W + R_{Air} + R_{Wave} + R_{Ice})v + P_{gen}, \quad (5)$$

где P_{SUM} — суммарная потребляемая мощность судовой энергетической установки судна;

μ — коэффициент полезного действия пропульсивной системы (двигателей);

R_W — сопротивление воды;

R_{Air} — сопротивление аэродинамическое;

R_{wave} — сопротивление волнению;

R_{Ice} — сопротивление льду;

v — мгновенная скорость судна;

P_{gen} — суммарная потребляемая мощность вспомогательных систем судна.

В такой постановке (5) сжигание топлива можно связать с прохождением судном маршрутом и его гидрометеоусловиями, включая скорость движения и возникающее сопротивление, т. е. учесть большинство природно-технических факторов. Если тактико-технические характеристики судна неизвестны, возможно использование метода Холленбаха (Hollenbach) для расчета сопротивления, что улучшает прогнозы по сравнению со стандартными решениями, которые предполагают только наличие данных о проектной скорости судна.

Разрабатываемое программное обеспечение учитывает движение судов в Финском заливе, по данным АИС (рис. 2). При этом, согласно обновленным моделям оценки «углеродного следа», выбросы распространяются в зависимости от скорости движения судна по всей протяженности маршрута, т. е. рассматривается динамическая модель.

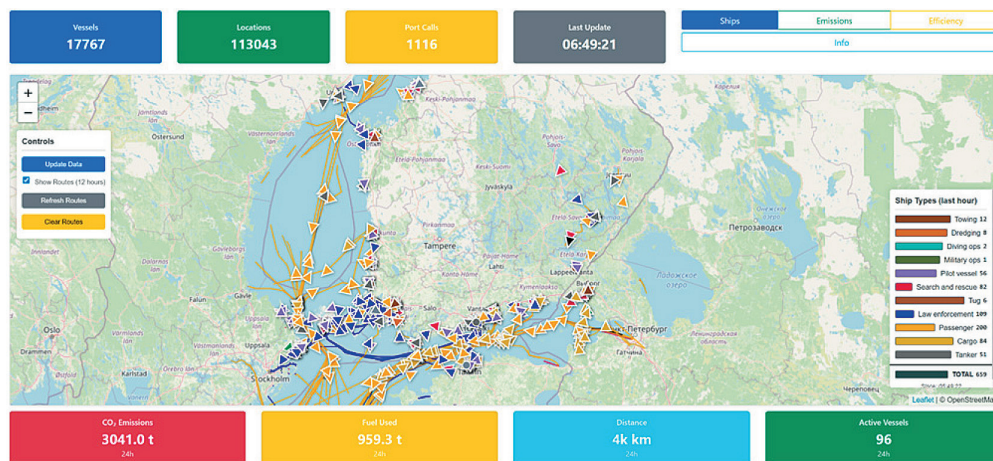


Рис. 2. Визуализация маршрутов движения судов в Финском заливе Балтийского моря (по данным АИС)
Fig. 2. Visualisation of vessel trajectories in the Gulf of Finland, Baltic Sea (based on AIS)

Согласно данным анализа информации из АИС, в период 2022–2025 гг. в Балтийском море ежегодно работало до 37 тыс. судов (в Финском заливе — 17 тыс.), из них к коммерческому морскому транспорту с валовой вместимостью более 1 000 GT относится не менее 1/3, судов смешанного река–море плавания — также до 1/3, остальные — суда, не имеющие регистрации ИМО (рис. 3). В рассматриваемом временном периоде количество судов увеличивалось на 4 % каждый год. В период зимней навигации, в районах, покрытых льдом, работало 1,7–2 тыс. судов, а в общем анализе углеродоемкости (СП) для судов этой категории было задействовано около 1,3 тыс. судов.

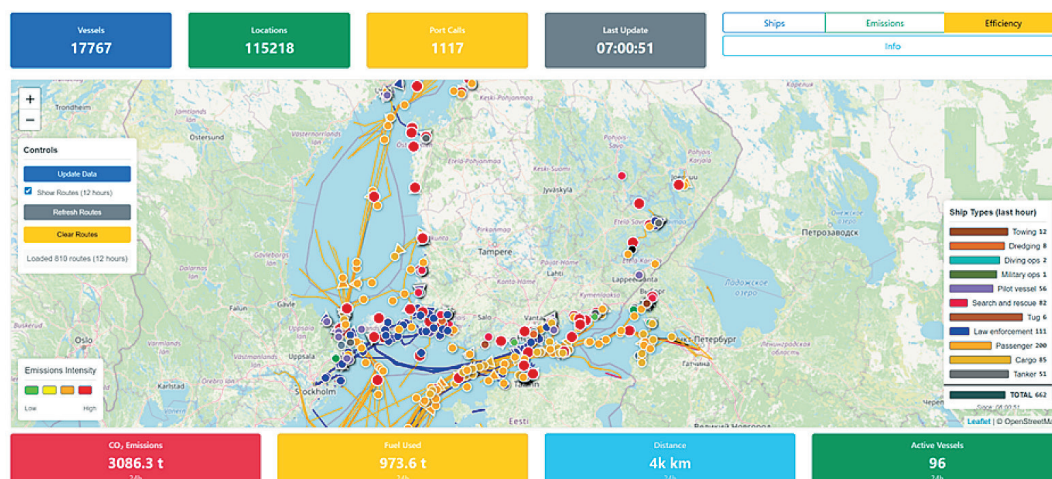


Рис. 3. Распределение интенсивности «углеродного следа» в зависимости от установленной мощности судна

Fig. 3. Distribution of carbon footprint intensity as a function of installed engine power

Дополнительно фиксируются данные PortCall о заходах судов в морские порты, рейдовых стоянках и т. п., что позволяет выявлять суда, являющиеся источником «углеродного следа» в условиях их нулевой или минимальной скорости движения (рис. 4).

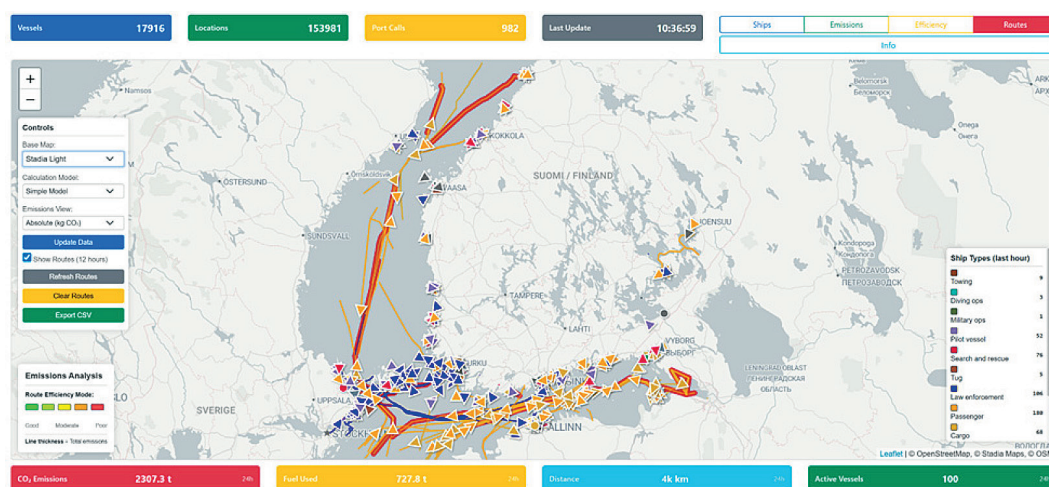


Рис. 4. Распределение интенсивности «углеродного следа» по маршрутам движения судов и в зависимости от их скорости

Fig. 4. Distribution of carbon footprint intensity along vessel routes and as a function of vessel speed

Нормативные инструменты ИМО (EEDI, EEXI, CII) обладают принципиальными ограничениями: они не измеряют реальные выбросы, а рассчитывают удельные показатели на основе проектных данных (EEDI, EEXI) и данных судовладельца (CII), не имеют географической привязки и непригодны для контроля в зонах выбросов или национальных кадастров. Альтернативой выступают динамические методы на основе данных АИС (например, модель STEAM), которые позволяют объективно, непрерывно и с пространственной детализацией оценивать выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ, а также выполнять внешний аудит самодекларируемой отчетности. В России на базе ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова разрабатывается собственное программное обеспечение для анализа АИС-данных, которое может применяться для оценки углеродного следа судов в Финском заливе и Балтийском море с учетом реальных условий плавания.

Заключение (Conclusion)

Сужение области применения исключительно до нормативных индексов создает риск «регуляторной слепоты» в отношении фактического экологического следа судоходства на акваториях, ограничивает компетенции государственных природоохранных органов и не позволяет в полной мере учитывать вклад более широкой номенклатуры ПГ. Модели оценки на базе АИС динамически рассчитывают нагрузку судовой энергетической установки на основе сопротивления, что непосредственно влияет на прогнозируемое потребление топлива и, как следствие, на выбросы.

Появляется возможность учета нелинейности удельного расхода топлива, такая величина является параболической функцией от нагрузки двигателя. Эффективность сжигания топлива, а расход минимален, в оптимальном диапазоне нагрузки, который обычно составляет 70–80 % от максимальной непрерывной мощности судовой энергетической установки.

В данном исследовании основной акцент сделан на улучшении и дополнении существующих моделей расчета «углеродного следа» морского судоходства при использовании динамических данных о движении судна — АИС-информации. Основной проблемой классических моделей выбросов является то, что расчетные параметры и коэффициенты практически не учитывают географическое движение судна; получается только некоторый условно «локальный» расчет выбросов или удельный расчет количества CO₂, выбрасываемого на тонно-милю груза, исходя из характеристик двигателя, топлива и грузоподъемности судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Maritime Organization. Fourth IMO GHG Study 2020. Full report. London: IMO, 2020. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx> (дата обращения: 26.01.2026).
2. American Bureau of Shipping. 2025 Sustainability Outlook: Maritime's Pathway to Net Zero. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://absinfo.eagle.org/acton/media/25745/2025-sustainability-outlook> (дата обращения: 26.01.2026).
3. IPCC. (2007). Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. R. K. Pachauri and A. Reisinger (Geneva, Switzerland: IPCC), 104. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (дата обращения: 26.01.2026).
4. IPCC. (2023). Summary for policymakers. in: climate change 2023: synthesis report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H Lee, J Romero, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages. (in press). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (дата обращения: 26.01.2026).
5. Клюев В. В. О конвергенции международного и национального регулирования выбросов парниковых газов в морском судоходстве / В. В. Клюев // Образование и право. — 2025. — № 1. — С. 470–476. — EDN HYLREN. DOI: 10.24412/2076-1503-2025-1-470-476.
6. Березин А. О. Сравнительный анализ документов стратегического планирования ИМО и Российской Федерации в области сокращения выбросов парниковых газов / А. О. Березин, С. А. Толмачев, В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23–34. — EDN WZWOPO.
7. Реуцкий А. С. Обновление рынка морских судов: внедрение альтернативных топлив и энергоэффективных технологий (EETs) / А. С. Реуцкий, А. А. Буцанец // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 06–20 октября 2025 года. Том 2. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2025. — С. 109–121.
8. International Maritime Organization. Resolution MEPC.203(62) — Amendments to MARPOL Annex VI on Regulations for the prevention of air pollution from ships (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships). IMO. — London, 2011. — 41 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

9. International Maritime Organization. Resolution MEPC.308(73) — Amendments to MARPOL Annex VI (Phases 3 for EEDI and other technical provisions) [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2018. — 23 p. — (MEPC 73/19/Add.1). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

10. International Maritime Organization. Resolution MEPC.350(78) — Amendments to MARPOL Annex VI (Enhanced Phase 3 requirements for EEDI and other amendments) [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2022. — 17 p. — (MEPC 78/17/Add.1). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

11. Буянов А. С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А. С. Буянов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70–71. — С. 13–28. — EDN QJIKBC.

12. International Maritime Organization. MEPC.1/Circ.896 — Unified Interpretation to the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2021. — 11 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

13. International Maritime Organization. Resolution MEPC.328(76) — Amendments to MARPOL Annex VI (On data collection system for fuel oil consumption of ships, and establishment of IMO Ship Fuel Oil Consumption Database) IMO. — London, 2021. — 34 p. — (MEPC 76/15/Add.2). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

14. International Maritime Organization. Resolution MEPC.333(76) — 2021 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2021. — 47 p. — (MEPC 76/15/Add.2, Annex 6). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

15. International Maritime Organization. Resolution MEPC.334(76) — 2021 Guidelines on the survey and certification of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2021. — 18 p. — (MEPC 76/15/Add.2, Annex 7). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

16. International Maritime Organization. MEPC.1/Circ.684 — Guidelines for voluntary use of the ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2009. — 34 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

17. International Maritime Organization. Resolution MEPC.282(70) — 2016 Guidelines for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) [Электронный ресурс] / IMO. — London, 2016. — 27 p. — (MEPC 70/18/Add.1, Annex 10). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> (дата обращения: 13.01.2026).

18. Шурпак В. К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В. К. Шурпак, М. С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70–71. — С. 29–36. — EDN QYFSKP.

19. Шурпак В. К. Влияние типа топлива на эксплуатационный показатель углеродоемкости (СИ) морских судов / В. К. Шурпак, Д. С. Семионичев, В. В. Коренев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 119–128. — EDN FDJPZY.

20. International Maritime Organization. MARPOL ANNEX VI. Regulations for the prevention of air pollution from ships. Resolution MEPC.328(76). 2021. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328(76).pdf) (дата обращения: 13.01.2026).

21. Реуцкий А. С. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А. С. Реуцкий, В. К. Шурпак, С. А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBBBJV.

22. Cariou P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? / P. Cariou // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2011. — Vol. 16. — Is. 3. — Pp. 260–264. DOI: 10.1016/j.trd.2010.12.005.

23. *Wan Z.* Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations / Z. Wan, A. el Makhoulfi, Y. Chen, J. Tang // *Marine Pollution Bulletin*. — 2018. — Vol. 126. — Pp. 428–435. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.064.
24. *Singh K.* Optimizing liquid hydrogen transport and trade through a hub-and-spoke model / K. Singh, S. Viswanathan // Preprint. Research Square. — 2025. — Pp. rs-6694850. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6694850/v1.
25. *Hulskotte J. H. J.* Fuel consumption and associated emissions from seagoing ships at berth derived from an on-board survey / J. H. J. Hulskotte, H. A. C. Denier van der Gon // *Atmospheric Environment*. — 2010. — Vol. 44. — Is. 9. — Pp. 1229–1236. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.018.
26. *Johansson L.* Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution / L. Johansson, J.-P. Jalkanen, J. Kukkonen // *Atmospheric Environment*. — 2017. — Vol. 167. — Pp. 403–415. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.042.
27. *Gan L.* Ship exhaust emission estimation and analysis using Automatic Identification System data: The west area of Shenzhen port, China, as a case study / L. Gan, W. Che, M. Zhou, C. Zhou, Y. Zheng, L. Zhang, N. Rangel-Buitrago, L. Song // *Ocean & Coastal Management*. — 2022. — Vol. 226. — Pp. 106245. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106245.
28. *Fan A.* A review of ship fuel consumption models / A. Fan, J. Yang, L. Yang, D. Wu, N. Vladimir // *Ocean Engineering*. — 2022. — Vol. 264. — Pp. 112405. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112405.
29. *Реуцкий А. С.* Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А. С. Реуцкий, В. В. Якимов, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
30. *Aakko-Saksa P. T.* Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options / P. T. Aakko-Saksa, K. Lehtoranta, N. Kuittinen, A. Järvinen, J.-P. Jalkanen, K. Johnson, H. Jung, L. Ntziachristos, S. Gagné, C. Takahashi, P. Karjalainen, T. Rönkkö, H. Timonen // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2023. — Vol. 94. — Pp. 101055. DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101055.
31. *Huang L.* Dynamic calculation of ship exhaust emissions based on real-time AIS data / L. Huang, Y. Wen, Y. Zhang, C. Zhou, F. Zhang, T. Yang // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2020. — Vol. 80. — Pp. 102277. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102277.
32. *Shu Y.* Evaluation of ship emission intensity and the inaccuracy of exhaust emission estimation model / Y. Shu, A. Hu, Y. Zheng, L. Gan, G. Xiao, C. Zhou, L. Song // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 287. — Pp. 115723. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115723.
33. IEC 62320–1:2009 Оборудование и системы морской навигации и радиосвязи. Автоматические системы идентификации (AIS).
34. Marine traffic information is gathered from Finnish Transport Infrastructure Agency's data sources. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.digitraffic.fi/en/marine-traffic/> (дата обращения: 02.01.2026).
35. Danish Maritime Authority (DMA). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dma.dk/safety-at-sea/navigational-information/ais-data> (дата обращения: 02.01.2026).
36. Danish Maritime Authority — AIS. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/dma-ais> (дата обращения: 02.01.2026).
37. HELCOM AIS data processing for statistics and maps. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/helcomsecretariat/AIS-data-processing-for-statistics-and-maps> (дата обращения: 02.01.2026).
38. *Ol'khovik E.* Assessment of the Possibility of Using a Waterway for Operation of Autonomous Ships / E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Zhidkova // *Transportation Research Procedia*. — 2023. — Vol. 68. — Pp. 383–388. — EDN LCMBEY. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.051.
39. *Смоленцев С. В.* Алгоритм анализа данных автоматической идентификационной системы для выделения типовых сценариев расхождения судов и тестирования систем автономного судовождения / С. В. Смоленцев, А. А. Буцанец, С. Ф. Шахнов [и др.] // *T-Comm*. — 2024. — Т. 18. — № 3. — С. 50–59. — EDN TYZNSI. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59.

REFERENCES

1. International Maritime Organization. Fourth IMO GHG Study 2020. Full report. London: IMO, 2020. Web. January 26, 2026 <<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>>.

2. American Bureau of Shipping. 2025 Sustainability Outlook: Maritime's Pathway to Net Zero. Web. January 26, 2026 < <https://absinfo.eagle.org/acton/media/25745/2025-sustainability-outlook> >.
3. IPCC. (2007). Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. R. K. Pachauri and A. Reisinger (Geneva, Switzerland: IPCC), 104. Web. January 26, 2026 < <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> >.
4. IPCC. (2023). Summary for policymakers. in: climate change 2023: synthesis report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H Lee, J Romero, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages. (in press). Web. January 26, 2026 < <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> >.
5. Klyuev, V. V. "About convergence of international and national regulations on greenhouse gas emissions from maritime shipping." *Education and Law* 1 (2025): 470–476. DOI: 10.24412/2076-1503-2025-1-470-476.
6. Berezin, A. O., S. A. Tolmachev and V. K. Shurpyak. "Comparative analysis of imo and russian federation strategic planning documents related to greenhouse gas emissions reduction." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 78 (2025): 23–34.
7. Reutskiy, A. S. and A. A. Butsanets. "Updating the marine vessel market: implementing alternative fuels and energy-efficient technologies (eets)." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova": Sbornik statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 06–20 oktyabrya 2025 goda. Tom 2*. SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2025: 109–121.
8. International Maritime Organization. Resolution MEPC.203(62) — Amendments to MARPOL Annex VI on Regulations for the prevention of air pollution from ships (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships). IMO. — London, 2011. — 41 p. Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> >.
9. International Maritime Organization. Resolution MEPC.308(73) — Amendments to MARPOL Annex VI (Phases 3 for EEDI and other technical provisions) [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2018. — 23 p. — (MEPC 73/19/Add.1). Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> >.
10. International Maritime Organization. Resolution MEPC.350(78) — Amendments to MARPOL Annex VI (Enhanced Phase 3 requirements for EEDI and other amendments) [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2022. — 17 p. — (MEPC 78/17/Add.1). Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> >.
11. Buyanov, A. S. and A. S. Reutskiy. "Formirovanie metodologicheskogo podkhoda k protsessu opredele-niya uglerodnogo sleda transportnoy uslugi s ispol'zovaniem koeffitsientov energoeffektivnosti sudna." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 70–71 (2023): 13–28.
12. International Maritime Organization. MEPC.1/Circ.896 — Unified Interpretation to the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2021. — 11 p. Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> >.
13. International Maritime Organization. Resolution MEPC.328(76) — Amendments to MARPOL Annex VI (On data collection system for fuel oil consumption of ships, and establishment of IMO Ship Fuel Oil Consumption Database) IMO. — London, 2021. — 34 p. — (MEPC 76/15/Add.2). Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> >.
14. International Maritime Organization. Resolution MEPC.333(76) — 2021 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2021. — 47 p. — (MEPC 76/15/Add.2, Annex 6). Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> >.
15. International Maritime Organization. Resolution MEPC.334(76) — 2021 Guidelines on the survey and certification of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2021. — 18 p. — (MEPC 76/15/Add.2, Annex 7). Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> >.
16. International Maritime Organization. MEPC.1/Circ.684 — Guidelines for voluntary use of the ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2009. — 34 p. Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> >.

17. International Maritime Organization. Resolution MEPC.282(70) — 2016 Guidelines for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) [Elektronnyy resurs] / IMO. — London, 2016. — 27 p. — (MEPC 70/18/Add.1, Annex 10). Web. January 13, 2026 < <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> >.
18. Shurpyak, V. K. and M. S. Bogdanov. “Analiz potrebleniya al’ternativnykh vidov topliva na morskikh sudakh.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 70–71 (2023): 29–36.
19. Shurpyak, V. K., D. S. Semionichev and V. V. Korenev. “The impact of fuel type on carbon intensity indicator (cii) of marine ships.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 76 (2024): 119–128.
20. International Maritime Organization. MARPOL ANNEX VI. Regulations for the prevention of air pollution from ships. Resolution MEPC.328(76). 2021. Web. January 13, 2026 < [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328\(76\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328(76).pdf) >.
21. Reutskiy, A. S., V. K. Shurpyak and S. A. Tolmachev. “Analysis of the imo guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 79 (2025): 14–25.
22. Cariou, P. “Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping?” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16.3 (2011): 260–264. DOI: 10.1016/j.trd.2010.12.005.
23. Wan, Z., A. el Makhoulfi, Y. Chen and J. Tang. “Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations.” *Marine Pollution Bulletin* 126 (2018): 428–435. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.064.
24. Singh, K. and S. Viswanathan. “Optimizing liquid hydrogen transport and trade through a hub-and-spoke model.” *Preprint. Research Square*. undefined (2025): rs-6694850. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6694850/v1.
25. Hulskotte, J.H.J. and H.A.C. Denier van der Gon. “Fuel consumption and associated emissions from seagoing ships at berth derived from an on-board survey.” *Atmospheric Environment* 44.9 (2010): 1229–1236. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.018.
26. Johansson, L., J.-P. Jalkanen and J. Kukkonen. “Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution.” *Atmospheric Environment* 167 (2017): 403–415. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.042.
27. Gan, L., L. Song et al. “Ship exhaust emission estimation and analysis using Automatic Identification System data: The west area of Shenzhen port, China, as a case study.” *Ocean & Coastal Management* 226 (2022): 106245. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106245.
28. Fan, A., J. Yang et al. “A review of ship fuel consumption models.” *Ocean Engineering* 264 (2022): 112405. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112405.
29. Reutskiy, A. S., V. V. Yakimov and A. A. Butsanets. “Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 76 (2024): 87–95.
30. Aakko-Saksa, P. T., H. Timonen et al. “Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options.” *Progress in Energy and Combustion Science* 94 (2023): 101055. DOI: 10.1016/j.peccs.2022.101055.
31. Huang, L., T. Yang et al. “Dynamic calculation of ship exhaust emissions based on real-time AIS data.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 80 (2020): 102277. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102277.
32. Shu, Y., L. Song et al. “Evaluation of ship emission intensity and the inaccuracy of exhaust emission estimation model.” *Ocean Engineering* 287 (2023): 115723. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115723.
33. IEC 61993–2(2001–12) Maritime navigation and radio communication equipment and systems — Automatic identification systems (AIS).
34. Marine traffic information is gathered from Finnish Transport Infrastructure Agency’s data sources. Web. January 02, 2026 < <https://www.digitraffic.fi/en/marine-traffic/> >.
35. Danish Maritime Authority (DMA). Web. January 02, 2026 < <https://www.dma.dk/safety-at-sea/navigational-information/ais-data> >.
36. Danish Maritime Authority — AIS. Web. January 02, 2026 < <https://github.com/dma-ais> >.
37. HELCOM AIS data processing for statistics and maps. Web. January 02, 2026 < <https://github.com/helcomsecretariat/AIS-data-processing-for-statistics-and-maps> >.
38. Ol’khovik, E., A. Butsanets and A. Zhidkova. “Assessment of the Possibility of Using a Waterway for Operation of Autonomous Ships.” *Transportation Research Procedia* 68 (2023): 383–388. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.051.

39. Smolentsev, S. V., A. A. Butsanets et al. "Algorithm for analyzing the automatic identification system data to identify typical scenarios for vessel divergence and testing the systems of autonomous shipping." *T-Comm* 18.3 (2024): 50–59. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Реуцкий Александр Сергеевич —
кандидат технических наук
Российский морской регистр судоходства,
191181 Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Миллионная ул., 7А
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reutskii Aleksandr. S. —
PhD in Technical Sciences,
Russian Maritime Register of Shipping,
7A Millionnaya Str., St. Petersburg, 191186,
Russian Federation
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Ol'khovik, Evgeniy O. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию: 27 января 2026 г.
Received: Jan. 27, 2026.*

**СИТУАЦИОННАЯ ОСВЕДОМЛЕННОСТЬ: ОТ ПАРАДИГМЫ
«ОБРАБОТКИ ДАННЫХ» К ПАРАДИГМЕ «УПРАВЛЕНИЯ ВОСПРИЯТИЕМ»****В. В. Астреин, С. И. Кондратьев, В. И. Филатов**

ФГБУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
г. Новороссийск, Российская Федерация

Темой исследования является разработка архитектуры системы ситуационной осведомленности для морского автономного судна четвертого уровня. Основная проблема, исследуемая в работе — неспособность классических алгоритмов слияния данных (фильтров Калмана, нейросетевых фузий) различать инструментальные отказы, деградацию точности и целенаправленные кибератаки, что критично для безопасной навигации автономного судна без экипажа на борту. Предложенная архитектура включает три ключевых компонента. Первый компонент — двухуровневая сенсорная организация — постоянно активное ядро, состоящее из основных навигационных и специализированных датчиков: лидары, оптические камеры и тепловизоры, подключаемые по сценарию. Для выполнения Правила 5 Международных правил по предупреждению столкновений судов (МППСС-72) о постоянном наблюдении предложена концепция «неотключаемого сенсорного ядра» — минимального набора датчиков, которые должны функционировать непрерывно вне зависимости от сценария. Адаптация к условиям плавания реализуется не отключением сенсоров, а динамическим взвешиванием их данных в модуле слияния. Второй компонент — менеджер доверия к сенсору — выполняет протокол управления соединением датчика, обеспечивающий изоляцию недостоверных источников до попадания данных в тракт слияния. Третий компонент — классификатор навигационных сценариев, который на основе детекторов освещенности, видимости, плотности движения и зоны плавания динамически назначает доверительные веса сенсорам в алгоритмах ковариационного слияния. Новизна предложенного подхода заключается во введении метаосведомленности, когда система ситуационной осведомленности оценивает не только внешнюю обстановку, но и собственное состояние («доверие к датчикам»). Впервые предложен переход от парадигмы «слияния данных» к парадигме «управления восприятием», что создает техническую основу при проектировании автономных судов.

Ключевые слова: автономное судно, ситуационная осведомленность, сборка сенсоров, слияние данных, доверие к сенсору, трехуровневая архитектура, инструментальная надежность, функциональная полнота восприятия, классификатор сценариев, неотключаемое сенсорное ядро.

Для цитирования:

Астреин В. В. Ситуационная осведомленность: от парадигмы «обработки данных» к парадигме «управления восприятием» / В. В. Астреин, С. И. Кондратьев, В. И. Филатов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 190–203. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-190-203. — EDN CQQKAW.

**SITUATIONAL AWARENESS: FROM A DATA PROCESSING PARADIGM
TO A PERCEPTION MANAGEMENT PARADIGM****V. V. Astrein, S. I. Kondratiev, V. I. Filatov**

Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

This article is devoted to the development of a situational awareness system architecture for a Level 4 autonomous marine vessel. The main problem addressed in this work is the inability of classical data fusion algorithms (Kalman filters, neural network-based fusion) to distinguish between sensor failures, accuracy degradation, and targeted cyberattacks, which is critical for ensuring safe unmanned navigation of an autonomous vessel. The proposed architecture includes three key components. The first component is a two-tier sensor organization: a continuously active core consisting of primary navigation and specialized sensors (LiDAR, optical cameras, and thermal imagers), activated according to the scenario. To comply with Rule 5 of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs-72) concerning continuous lookout, the concept of a “non-switchable sensor core” is proposed — a minimum set of sensors

that must function continuously regardless of the scenario. Adaptation to navigation conditions is achieved not by disabling sensors, but by dynamically weighting their data in the data fusion module. The second component, the Sensor Trust Manager, implements a sensor connection management protocol that ensures the isolation of unreliable sources before the data enters the fusion process. The third component, the navigation scenario classifier, dynamically assigns confidence weights to sensors in covariance-based fusion algorithms based on illumination, visibility, traffic density, and navigation area. The novelty of the proposed approach lies in the introduction of meta-awareness: the situational awareness system evaluates not only the external environment but also its own state ("sensor trust"). For the first time, a transition from the "data fusion" paradigm to the "source trust management" paradigm is proposed, creating a technological foundation for the design of autonomous vessels.

Keywords: autonomous vessel, situational awareness, sensor suite, data fusion, sensor trust, three-layer architecture, instrumental reliability, functional completeness of perception, navigation scenario classifier, non-switchable sensor core.

For citation:

Astrein, Vadim V., S. I. Kondratiev and V. I. Filatov. "Situational awareness: from a data processing paradigm to a perception management paradigm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 190–203. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-190-203.

Введение (Introduction)

Переход к автономному судовождению четвертого уровня (полная автономия без экипажа на борту) ставит перед инженерной мыслью принципиально новый класс задач. Если традиционные системы автоматизации лишь ассистировали человеку, то теперь искусственный интеллект должен полностью принять на себя функции капитана, важнейшей из которых является *ситуационная осведомленность* (Situational Awareness) — способность воспринимать, понимать и прогнозировать состояние окружающей среды.

Ключевой вызов заключается в том, что инструментальная надежность датчиков не равна функциональной надежности восприятия. Можно установить три резервных радара и пять лидаров, но если система не умеет отличить отказ датчика от внешней атаки, если она не знает, какой сенсор заслуживает доверия в тумане, а какой — в узкости, то избыточность превращается в балласт.

Существующие подходы к слиянию данных (фильтры Калмана, нейросетевые фузии) рассматривают датчик как всегда честный, но иногда шумный источник. Реальность сложнее: датчик может быть взломан, загрязнен или находится под воздействием внешней помехи, которая делает его показания не просто неточными, а целенаправленно ложными.

Несмотря на впечатляющий прогресс в области сенсорики и машинного обучения, существующие архитектуры систем ситуационной осведомленности (ССО) наследуют подходы, разработанные для судов с экипажем. Они ориентированы на представление данных человеку, а не на автономное принятие решений машиной. Это порождает фундаментальное противоречие: технически система может «видеть» мир, но юридически и функционально она не способна гарантировать исполнение, например, Правила 5 МППСС-72, согласно которому необходимо «*постоянное наблюдение с помощью всех имеющихся средств*».

Настоящее исследование исходит из презумпции недоверия к сенсору. В данной работе предлагается архитектура, в которой каждый источник данных проходит через протокол верификации, изоляции и восстановления, прежде чем его показания попадут в контур принятия решений. Такой подход позволяет не только повысить надежность ССО, но и впервые формально замкнуть требования МППСС-72 на техническую реализацию автономного судна. Таким образом, целью исследования является разработка архитектуры системы ситуационной осведомленности для морского автономного судна четвертого уровня, обеспечивающей функциональную полноту восприятия, инструментальную надежность и киберустойчивость, а также соответствие требованиям Правила 5 МППСС-72.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ требований Правила 5 МППСС-72 и их интерпретация для полностью автономных систем.

2. Обоснование сенсорной архитектуры.
3. Разработка протокола управления доверием к сенсору.
4. Построение адаптивного классификатора навигационных сценариев.
5. Интеграция предложенных компонентов в единую архитектуру системы ситуационной осведомленности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В литературе понятие «ситуационная осведомленность» тесно связано с авиационной отраслью [1–4] и соответствует специфике одной области — пилотированию самолетов. Однако сейчас ситуационная осведомленность изучается в различных областях: образовании, диспетчеризации аэропортов, техническом обслуживании, прогнозировании погоды, медицине и т. д. Несмотря на то, что ситуационная осведомленность была первоначально разработана для решения задач авиации (пилотирование и управление воздушным движением), ее концепция может использоваться в автономном мореплавании. В настоящее время осведомленность о морской ситуации является основой для разрабатываемых автономных судов и определяется уровнями их автономности.

Международная морская организация (ИМО) определила четыре уровня автономности для морских автономных надводных судов (МАНС): от судов с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений, судов с дистанционным управлением (с экипажем и без него) до полностью автономных судов. Утверждается, что по мере развития технологий в сфере морских операций системы ситуационной осведомленности будут собирать большие объемы данных, анализировать и использовать их для достижения высочайшего уровня безопасности, защищенности и эффективности автономных судов. Исследование [5] показывает, что внедрение МАНС даст много преимуществ, в то же время существует множество барьеров, которые могут препятствовать полной интеграции МАНС в современное мореплавание.

В конце XX в. был предложен ряд моделей, основанных на понятии ситуационной осведомленности. Однако наибольшее распространение получила *трехуровневая модель ситуационной осведомленности Миры Эндсли* [4], состоящая из трех иерархических уровней оценки ситуационной осведомленности. Эта модель представляет собой цикл обработки информации, ее восприятия, понимания и прогнозирования. Уровни ситуационной осведомленности, предложенные в [4], следующие:

Уровень 1 — восприятие элементов окружающей среды — самый низкий уровень ситуационной осведомленности, связанный с восприятием информации от бортовых датчиков (например, курс и скорость своего судна, судов-целей, условий плавания и т. д.).

Уровень 2 — понимание текущей ситуации, которое следует за восприятием элементов в случае, если данные можно интегрировать и синтезировать для понимания их значимости (например, существование опасности столкновения, расстояние и время кратчайшего сближения и т. д.).

Уровень 3 — прогнозирование будущего состояния судна — наивысший уровень ситуационной осведомленности, связанный со способностью прогнозировать развитие ситуации на основе текущих событий и динамики процесса, что позволяет своевременно принимать решения (например, прогнозировать маневры при расхождении судов).

Модель ситуационной осведомленности, приведенная на рис. 1, представляет собой три иерархических уровня оценки ситуационной осведомленности как один из этапов принятия решений. В этой модели ситуационная осведомленность четко обозначена как отдельный этап, а не как единый комбинированный процесс — от восприятия окружающей среды до принятия решения и оказания управляющего воздействия на механизмы, обеспечивающие навигационную безопасность плавания судна, предупреждение столкновений судов и безопасность внутренней структуры судна.

Трехуровневая модель ситуационной осведомленности [4] для дистанционно управляемых и автономных интеллектуальных судов крайне важна для восприятия окружающей среды посредством множества источников данных и обработки информации в режиме реального времени с помощью систем искусственного интеллекта (ИИ). Такая модель ситуационной осведомленности должна решать следующие задачи:

- во-первых, за счет избыточности навигационной информации должна отбирать лучшие параметры или реконфигурировать систему на сбор наиболее значимых данных для мониторинга, анализа ситуаций и угроз применительно к преобладающим обстоятельствам и условиям плавания;
- во-вторых, осуществлять синтез датчиков автономного судна, превращая их из простых сборщиков данных в интеллектуальные информационные системы с повышенной точностью и своевременностью данных;
- в-третьих, повышать надежность системы за счет слияния информации датчиков, уменьшая влияние некорректных данных или помогать находить решения, когда собранные данные непригодны для конкретной задачи.

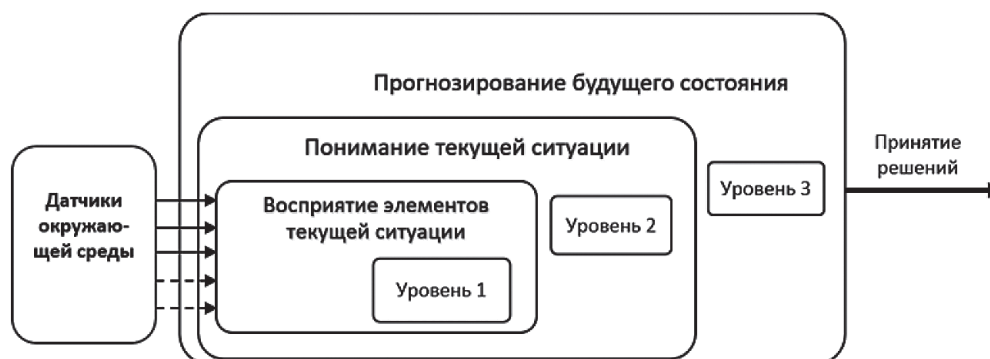


Рис. 1. Три иерархических уровня оценки ситуационной осведомленности
Fig. 1. Three hierarchical levels of situational awareness assessment

Выполнение этих задач связано с обработкой данных множества датчиков, интегрированных с системами ИИ для постоянного обновления знаний о состоянии окружающей среды. Следовательно, исследования на этапе разработки концепции МАНС должны быть направлены на проблемы, связанные с разработкой архитектуры и методов обработки данных с РЛС, ЛИДАР, ГНСС, АИС, оптических камер и других датчиков, информация которых должна обрабатываться в реальном времени для обнаружения судов и навигационных опасностей. Постоянно интегрируя сенсорные потоки, модели должны распознавать мелкие или удаленные объекты (человека в воде, плавающий мусор и т. д.), вести наблюдение в условиях ограниченной видимости, в условиях сильной качки, неблагоприятных гидро- и метеоусловиях. ССО МАНС с помощью ИИ должна будет обеспечивать более полное и точное понимание окружающей среды в режиме реального времени, что является крайне важным для автономных судов.

По мере развития сенсорных технологий и роста вычислительных возможностей ССО станет фундаментальной инфраструктурой в интеллектуальных системах автономных судов. Следовательно, задача будет заключаться в выборе подходящих методов, алгоритмов, архитектур и комбинаций датчиков с целью достижения безопасности, точности и эффективности по сравнению с использованием отдельных датчиков и разобщенных потоков данных.

Результаты (Results)

Архитектура МАНС на стадии разработки концепции прежде всего должна отвечать следующим основным требованиям:

- во-первых, инструментальной надежности (избыточность, отказоустойчивость, синхронизация);
- во-вторых, в функциональной полноте восприятия окружающей среды (сборка сенсоров должна быть осуществлена в зависимости от решения задачи).

Инструментальная надежность датчиков МАНС. Датчики являются неотъемлемой частью технических средств судовождения. Они делятся на пассивные и активные, которые могут быть использованы для решения различных задач навигации и предупреждения столкновений судов.

Пассивные системы навигации предполагают прием информации о положении и параметрах движения судна от внешних источников. Примером пассивной навигации являются системы определения координат с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС): GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и др., являющихся комплексом электронно-технических систем, в состав которых входит наземное и космическое оборудование, предназначенное для определения местоположения (позиционирования) в общепринятой системе координат, а также параметров движения (скорости, направления движения и др.).

Активные системы навигации направлены на получение информации о положении судна автономными способами вне зависимости от воздействий и контактов с окружающей средой. Одними из основных направлений в данном типе навигации являются локальные системы навигации, основанные на лазерных дальномерных и инерциальных системах навигации (ИНС).

В морской навигации используются как активные, так и пассивные сенсоры, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны, комплексное использование которых позволяет нивелировать недостатки отдельных систем. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики основных типов датчиков, их преимущества и недостатки.

Таблица 1

Характеристики основных типов датчиков

Table 1

Characteristics of the main types of sensors

Тип датчика	Принцип действия	Преимущества	Проблемы, недостатки
ГНСС (GPS/ГЛОНАСС)	Прием сигналов со спутников для определения координат	Высокая точность абсолютного позиционирования	Требует прямой видимости спутников, возможны помехи
РЛС	Активное излучение радиоволн для обнаружения объектов	Независимость от освещения и погоды	Высокая стоимость, наличие слепых зон, помехи от морских волн
АИС (Автоматическая идентификационная система)	Передаёт и принимает данные о судне (позиция, курс, скорость) по радиочастоте	Большой набор статистической и динамической информации для безопасности мореплавания	Не работает при выключенном транспондере. Дискретность инфо зависит от скорости судна
ИНС (Инерциальная навигационная система)	Измерение ускорения и угловых скоростей для расчета позиции	Полная автономность, не зависит от внешних сигналов	Накопление ошибки (дрейф) с течением времени
Оптические камеры	Пассивное получение изображений окружающей обстановки	Высокая детализация, возможность анализа с помощью ИИ	Зависимость от погодных условий и освещенности

Сбор данных на МАНС во многих случаях может завершиться неудачей. Потеря данных с ключевых датчиков в системах МАНС может быть связана с аппаратными, программными или эксплуатационными причинами.

Основные причины потери данных:

- аппаратные сбои датчиков и контроллеров: выход из строя самих датчиков, поломка или сбой в работе вычислителя или модулей ввода-вывода из-за скачков напряжения, перегрева или физического износа;
- проблемы со связью и передачей данных: обрыв кабелей, сбой сетевых протоколов, неисправность коммуникационных модулей или ошибки настройки сети, которые приводят к потере пакетов данных;
- электромагнитные помехи: помехи от силового электрооборудования или частотных преобразователей;

- программные ошибки и сбои конфигурации: сбой встроенного контроллера, неверные настройки;
- некорректное обслуживание: ошибки персонала при перезагрузке системы, изменении конфигурации, обновлении ПО;
- синхронизация времени: если GPS отметки времени датчиков отличаются даже незначительно, то их синтез будет сильно ухудшаться;
- дрейф датчиков: в течение месяцев и лет выходные данные датчиков изменяются из-за старения компонентов, теплового воздействия и агрессивной среды (танкера, газозовы, химозовы);
- шум и качество данных: реальные данные датчиков повреждены шумами, помехами окружающей средой;
- калибровка датчиков: датчики должны быть индивидуально калиброваны по известным эталонным стандартам, и при комбинировании нескольких датчиков перекрестная калибровка обеспечивает правильное совпадение измерений;
- вычислительные ограничения: вычислительные алгоритмы должны обеспечить баланс точности с имеющимися вычислительными возможностями;
- конфиденциальность и безопасность: по мере того как синтез датчиков позволяет более детально воспринимать процессы и окружающую среду, чаще возрастают риски киберугроз, а значит, данные датчиков требуют особых методов защиты.

Для МАНС архитектура ССО должна отвечать требованию восстановления работоспособности датчика на многоуровневом дублировании. Потеря данных даже с одного ключевого датчика должна компенсироваться в реальном времени. Ключевые датчики ССО и методы их восстановления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ключевые датчики и методы их восстановления

Table 2

Key sensors and methods for their recovery

Категория данных	Ключевые датчики	Причины потерь	Способы восстановления
Широта, долгота, курс, скорость	ГНСС, ИНС, Доплеровский лаг, Гирокомпас	Помехи, затенение, сбой антенны, отказ оборудования	1. Автоматическое переключение на резервный ГНСС-приемник или систему (например, с GPS на ГЛОНАСС). 2. Краткосрочная навигация по счислениям (Dead Reckoning) на основе данных ИНС (ускорения, угловые скорости) и данных лага. ИНС способна поддерживать точную позицию в течение нескольких минут после потери ГНСС. 3. Коррекция от визуальной / радарной навигации — привязка к известным береговым объектам или буям.
Информация о судах-целях (другие суда)	АИС, РЛС, ЛИДАР, Оптические / Тепловизионные камеры	Перегрузка данных АИС, аппаратный сбой АИС, погодные помехи для радара/камер	1. Дублирование РЛС. 2. Слияние данных (Fusion) от РЛС и АИС: если цель теряет АИС-сигнал, она продолжает отслеживаться РЛС по тому же вектору движения. 3. Визуальное подтверждение и классификация системами компьютерного зрения: камеры могут определить класс судна и параметры движения, даже если они не передаются АИС.
Окружающая среда	ЭКДИС	Нарушение физических соединений. Проблемы с данными или ПО	1. Переключиться на резервную систему. 2. Проверить целостность кабелей, подключений, переключить источник данных. 3. Перезагрузка системы или переустановка ПО.

Требование к инструментальной надежности датчиков МАНС диктует необходимость перехода к интеллектуальной стратегии — прогностическому (предиктивному) обслуживанию ключевых датчиков системы ситуационной осведомленности, суть которого заключается в предсказании момента отказа конкретного датчика на основе анализа его фактического состояния.

Ключевым технологическим элементом, который делает эту стратегию реализуемой, является *цифровой двойник* — динамическая виртуальная копия как отдельного датчика, так и ССО в целом, где непрерывный поток контролируемых параметров ССО в реальном времени обрабатывается интеллектуальной нейронной сетью рекуррентного типа (RNN), выявляя тенденции к переходу в предотказные состояния агрегатов и элементов ССО.

Другие классы нейронных сетей (многослойные перцептроны и сверточные нейронные сети) могут использоваться для классификации дефектов и предотказных состояний. Для автономных судов проблема надежной работы датчиков МАНС решается также созданием архитектуры эффективной избыточной и интеллектуальной сенсорной системы.

Задача функциональной полноты восприятия окружающей среды ССО. Архитектура ССО должна объединять доступную информацию из мультисенсорных систем восприятия МАНС, чтобы создать единое согласованное понимание окружающей среды. Например, обнаружение судов и небольших объектов должно обеспечиваться как на достаточно больших расстояниях, так и с покрытием мертвых и теневых секторов с помощью РЛС, лидаров, оптических и инфракрасных камер, а для измерения расстояния до целей может использоваться другая сборка сенсоров, например, РЛС и лазерный дальномер (LRF).

Несмотря на то, что существующие исследования достаточно хорошо описывают технические возможности отдельных датчиков, они не учитывают эффективность сборки сенсорных комплексов для различных конфигураций датчиков на основе решаемых задач судовождения. Выбор наборов датчиков часто преподносится как эвристический процесс, ориентированный на общие технические характеристики датчиков и их возможности по восприятию окружающей среды. На сегодняшний день нет четкой методологии, которая могла бы определить эффективность сборки датчиков и ответить на вопрос: достаточна ли минималистичная сборка или необходимая сложная конфигурация датчиков для решения задач автономного судовождения.

Исследования по разработке архитектур интеллектуальных ССО, которые в состоянии воспринимать информацию о состоянии внешнего мира и собственном состоянии ведутся как в России, например в [6–7], так и за рубежом [8–10]. В [7] предложен синтез моделей когнитивных систем мониторинга, который заключается в нахождении целесообразного способа построения вычислительной модели, при котором достигается экстремум основного показателя эффективности (объема эффективно потребляемых ресурсов) при ограничениях на вспомогательные показатели эффективности.

Необходимо найти целесообразный способ B_0 построения вычислительной модели C_0 , при котором достигается W_{opt} — экстремум основного показателя эффективности (объема эффективно потребляемых ресурсов) при ограничениях на вспомогательные показатели эффективности $M(B_V)$ — параметры моделей когнитивного мониторинга:

$$W_{\text{opt}}(B_0) = \text{extr}_{V \in \Lambda} \{W_V(M(B_V))\},$$

где Λ — множество вариантов построения вычислительных моделей;

$$M(B_V) = F(R(B_V), E(B_V), T(B_V)),$$

где $M(B_V) \in DM$ — область допустимых значений мониторинга; $R(B_V) \in DR$, DR — область допустимых изменений требований к мониторингу; $E(B_V) \in ER$, ER — ограничения, определяемые параметрами среды мониторинга; $T(B_V) \in ET$, ET — множество допустимых технологий.

Как модель, так и способ ее построения определяются на каждый момент времени t_k . Таким образом, на интервале времени $[t_{k-1}, t_{k+i}]$ определяются $2t + 1$ моделей: $\{B_0(t_{k-i}), C_0(t_{k-i})\}_0^{2t}$.

Рассмотренный подход к построению вычислительных моделей расширяет возможности синтеза развивающихся (перестраивающихся) когнитивных систем мониторинга и позволяет считать его элементом методологической базы теории когнитивных систем мониторинга. Значимость исследования [7] заключается в предоставлении систематической основы, которая меняет парадигму проектирования от подхода «чем больше, тем лучше» к интеллектуальной контекстно-ориентированной композиции, что позволяет разрабатывать действительно надежные и эффективные сенсорные архитектуры с возможностью применения на МАНС.

В работе [9] предложена двухступенчатая процедура систематического сравнения различных комбинаций датчиков от минималистичных до максимально спроектированных архитектур на основе сценариев. Для оценки и систематического сравнения различных конфигураций датчиков в [9] предложены шесть параметров эффективности (1 — точность измерения дистанций; 2 — точность измерения пеленгов; 3 — дальность обнаружения, 4 — поле зрения; 5 — дискретность информации и 6 — энергопотребление), которые отражают как эксплуатационные требования МАНС, так и обеспечивают сравнение различных типов датчиков по некоторому фактору базовой значимости каждого датчика (α_i) как основа для агрегирования индивидуальных параметров датчиков $S_{core}(i)$ в единый репрезентативный профиль эффективности наборов датчиков $\sum_k S_{core}(k)$ для каждого сценария:

$$\alpha_i = \frac{S_{core}(i)}{\sum_k S_{core}(k)}.$$

где α_i — оценка для каждого датчика i количественно оценивает, насколько хорошо он работает самостоятельно в соответствующем сценарии.

Чтобы определить значимость сенсоров, связанных со сценариями, нормализуются оценки всех датчиков для сценария s :

$$\alpha_i^s = \frac{S_{core\ s}(i)}{\sum_k S_{core\ s}(k)},$$

где $S_{core\ s}(i)$ — индивидуальный балл сенсора i в сценарии s .

Таким образом, каждый датчик i в каждом сценарии s получает взвешенную долю α_i^s , что отражает его значимость для соответствующего сценария; α_i^s -профиль служит основой для последующего слияния нескольких датчиков.

В результате слияния датчиков создается матрица принятия решений для каждого сценария s , включающая опции различных наборов датчиков, с помощью которых можно определить, какой набор датчиков ближе всего подходит к оптимальной конфигурации. Этот подход детализируется в [10] и обеспечивает более стабильные ранжирование датчиков, а также снижает восприимчивость к эффектам доминирования параметров, позволяя распределять приоритеты конфигураций сенсоров в различных операционных контекстах. Необходимо отметить, что рассматриваемый подход, предложенный в 2025 г., является перспективным при разработке ССО.

Учитывая [8–10], вначале авторами исследования была предложена *двухуровневая архитектура восприятия* окружающей среды («как ведет наблюдение судоводитель») для решения конкретной задачи судовождения с целью достижения «максимальной эффективности». Главные правила сборки датчиков в такой архитектуре основаны на базовой конфигурации и включении / выключении дополнительных датчиков для восприятия окружающей среды:

1-й уровень. Базовым ядром такой архитектуры являются три семейства датчиков, которые работают всегда независимо от обстоятельств и условий плавания:

- РЛС — всепогодный сенсор, хорошо работающий на больших расстояниях в любую погоду, но имеющий низкую частоту обновления информации (~0.5 Гц) и сильные погрешности на волнении;

- АИС (автоматическая идентификационная система) — информационная система для непрерывного обмена статической, динамической информацией между судами, а также береговыми станциями с помощью радиоволн УКВ диапазона;

– ГНСС и ИНС (инерциальная система навигации) — ГНСС обеспечивает точные координаты, но подвержена влиянию ионосферных факторов, солнечной активности, атакам злоумышленников, в то время как ИНС обеспечивает в течение непродолжительного времени независимую работу и высокую частоту обновления информации.

2-й уровень — дополнительный — включается для решения задачи в той или иной ситуации. Лидар, оптическая и инфракрасные камеры позволяют вести наблюдение в теневых секторах РЛС с высокой частотой обновления информации. Лидар позволяет получать точную геометрию объектов, а камера — классифицировать объекты на воде (судно / буй / катер), но подвержена влиянию качки, заливаемости и забрызгиванию морской водой, освещенности.

Идея двухуровневой архитектуры заключается в том, чтобы мощные, но «тяжелые» нейросети на камерах и лидарах подключались только тогда, когда нужно детально рассмотреть конкретный объект (например, подозрительный катер). Максимальная эффективность двухуровневой архитектуры достигается, когда датчики взаимно дополняют друг друга, подключаясь для выполнения конкретной задачи (например, плавание в узкостях, швартовка, сопровождение, охрана судна и т. д.).

Недостаток предложенной двухуровневой архитектуры восприятия окружающей среды заключается в том, что она не рассматривает случаи и природу отказа: сбой датчика, внешняя атака, деградация точности, потеря калибровки, загрязнение датчика — все это требует разных протоколов и мер реакции на инцидент. Например, пока неисправный датчик подключен к шине, его ошибочные данные могут «загрязнять» фильтр Калмана или процедура восстановления после отказа датчика (валидация) требует специальной проверки для подтверждения пригодности и безопасности включения этого датчика для дальнейшего применения.

Для обеспечения работоспособности ССО в целом текущая архитектура в случае выхода из строя какого-либо датчика должна предусмотреть протокол резервирования, переключая поврежденный датчик на резервный. Резервирование здесь не просто «протокол отключения неисправного датчика» или переход на дублирующий датчик, но и протокол управления доверием к источнику данных (Sensor Trust Management Protocol).

Предложенная двухуровневая архитектура восприятия среды действительно упускает слой между физическим датчиком и модулем слияния; следовательно, она должна быть дополнена соответствующим блоком (*менеджером доверия к сенсору*) между физическим уровнем датчика и модулем слияния данных (рис. 2). Этот блок реализует протокол управления доверием и выполняет следующие функции: детекцию аномалий, изоляцию, компенсацию, восстановление.



Рис. 2. Трехуровневая архитектура ССО с учетом протокола управления соединением датчиков
Fig. 2. Three-layer architecture of the situational awareness system with consideration of the sensor connection management protocol

Предложенный протокол управления (третий слой) — см. рис. 2 — соединением датчиков добавляет в архитектуру ССО дополнительно:

– доверие как управляемый ресурс: датчик должен «заработать» право передавать данные на слияние;

- различение отказов и атак: разные стратегии реакции на инцидент;
- изоляцию «грязных» данных на периферии до «загрязнения фильтров»;
- автоматическое восстановление и реинтеграцию;
- полную прослеживаемость протокола управлением соединения датчиков: каждый акт отключения / включения фиксируется / логируется (отказ → изоляция → компенсация → восстановление).

Оценивая правовую сторону предложенной трехуровневой архитектуры ССО, становится ясно, что она не учитывают еще один существующий нормативный базис: Международные правила по предупреждению столкновений судов (МППСС-72). Правилом 5 МППСС-72 установлено следующее требование: *«Каждое судно должно постоянно вести надлежащее визуальное и слуховое наблюдение, так же, как и наблюдение с помощью всех имеющихся средств, применительно к преобладающим обстоятельствам и условиям»*. Это требование к надлежащему наблюдению может выполняться на дистанционно управляемых судах без существенных изменений данного правила. Для полностью автономных судов четвертого уровня автономности предложенная архитектура не может рассматриваться как соответствующая МППСС-72.

Чтобы компенсировать этот недостаток для МАНС четвертого уровня автономности, были предложены *формальная архитектурная спецификация и концептуальная модель наблюдения* с использованием принципа «неотключаемого базового ядра» и адаптивного взвешивания.

Правовая позиция термина «визуальное наблюдение» для автономной навигации может быть реализована совокупностью оптических, инфракрасных и тепловизионных сенсоров (Electronic Eye), термин «слуховое наблюдение» реализуется системой акустического мониторинга (Electronic Ear), термин «все имеющиеся средства» означает тотальную и непрерывную активацию всех сенсорных систем, установленных на судне вне зависимости от ситуации, условий и обстоятельств плавания.

Ключевое отличие рассматриваемого подхода от классического судовождения, когда вахтенный помощник, исходя из «опыта обычной и хорошей морской практики», выбирает, какие датчики использовать в создавшейся ситуации, заключается в том, что в автономной системе все приборы используются постоянно. Адаптация в автономном судовождении к обстоятельствам условиям плавания осуществляется не на уровне включения / выключения, а на уровне алгоритмического доверия к данным датчиков.

Архитектура системы наблюдения строится на принципах двухуровневой сенсорной архитектуры, описанной со следующими наборами датчиков:

Уровень 1 — базовое сенсорное ядро: РЛС (X/S), АИС класса А, ГНСС/ИНС, гироскоп, оптические камеры видимого спектра (круговой обзор), тепловизионные / ИК-камеры, микрофонные массивы (акустические камеры), ECDIS. Режим функционирования непрерывный. Отключение любого датчика в штатном режиме плавания квалифицируется как потеря соответствия, т. е. отключать датчики нельзя, что, согласно Правилу 2, автоматически инициирует переход судна в «ограниченно функциональное» состояние с уведомлением берегового центра управления.

Уровень 2 — специализированные сенсорные модули: ЛИДАР, доплеровские лаги, гидролокаторы, многолучевые эхолоты, стереокамеры высокого разрешения. Режим функционирования: постоянная аппаратная готовность (непрерывное электропитание, рабочее состояние сенсоров), программно-управляемая активация передачи данных в тракт слияния. Физическое отключение допускается только в режиме стоянки или по команде берегового оператора при подтвержденной неисправности.

Адаптация к преобладающим обстоятельствам и условиям плавания. Основой адаптации к обстоятельствам и условиям плавания предложен оригинальный классификатор, спроектированный специально под двухуровневую архитектуру восприятия с адаптивным взвешиванием и требованиями

Правила 5 МППСС-72. Классификатор сценариев, являясь компонентом модуля слияния данных (Fusion Node), выполняет функцию метаосведомленности: он определяет, в каких «преобладающих обстоятельствах и условиях» (формулировка Правила 5) находится судно в данный момент. Классификатор не отключает сенсоры, он лишь назначает доверительные коэффициенты для блока слияния, сохраняя полное соответствие императиву «постоянного использования всех имеющихся средств».

Ядром алгоритма классификатора является композитная классификация, работающая как для однозначной классификации с использованием продукционных правил, так и для вероятностного Байесовского корректора, предназначенного для нештатных или неоднозначных комбинаций данных, обученного на исторических данных. На выходе классификатор формирует матрицу доверительных коэффициентов для каждого активного сенсора (табл. 3).

Таблица 3

Матрица доверительных коэффициентов (пример реализации)

Table 3

Trust Coefficient Matrix (Implementation Example)

Сценарий / Обстоятельства	РЛС	Оптика	Тепловизор	ЛИДАР	АИС	Микрофоны
Открытое море, день $V > 15$ уз	0,7	0,6	0,3	0,2	0,8	0,1
Открытое море, ночь	0,8	0,1	0,8	0,3	0,8	0,2
Туман / осадки, видимость < 1 мили	0,9	0,0	0,4	0,1	0,7	0,5
Стесненные воды, порт	0,4	0,7	0,6	0,8	0,6	0,3
Обнаружение сигнала бедствия	0,7	0,8	0,8	0,5	0,9	0,9

Коэффициенты не являются порогами включения / выключения. Все сенсоры непрерывно подают данные в систему. Коэффициент 0,0 означает, что данные датчика не влияют на формирование управляющего решения, но продолжают архивироваться и могут быть использованы для постанализа или диагностики. Изменение весов осуществляется автоматически на основе классификации текущей навигационной ситуации.

Предложенный алгоритм классификатора сценариев, полностью соответствует Правилу 5 МППСС-72 (все сенсоры работают непрерывно, веса меняются, а не включаются / выключаются, интегрируются в разработанную ранее трехуровневую архитектуру восприятия среды, используют детекторы на основе данных, присутствующих в системе (РЛС, АИС, ЭКДИС и т. д.), является расширяемым — база правил может пополняться по результатам эксплуатации. Таким образом, предложенная архитектурная спецификация и концептуальная модель наблюдения обеспечивают:

- полноту охвата (на судне установлены и постоянно функционируют средства, перекрывающие все виды наблюдения, согласно требованиям Правила 5 МППСС-72: визуальное, слуховое, радиолокационное, идентификационное;
- непрерывность наблюдения (архитектура исключает возможность преднамеренного или случайного отключения любого датчика в штатных режимах плавания);
- адаптивность в рамках МППСС-72 (изменение весов слияния данных не является «отказом от использования средства наблюдения», а служит методом интерпретации данных в соответствии с преобладающими условиями, что допускается формулировкой «применительно к условиям и обстоятельствам»);
- документирование: все акты адаптации взвешивания логируются, архивируются и доступны для постинцидентного анализа, что обеспечивает прозрачность и доказуемость надлежащего исполнения обязанности наблюдения на автономном судне.

Обсуждение (Discussion)

Предложенная архитектура не является окончательным решением проблемы ситуационной осведомленности. К этим ограничениям относятся:

- зависимость от качества классификатора сценариев — ошибочная классификация навигационной ситуации (например, неверное определение зоны плавания) может привести к неоптимальному назначению весов;

— вычислительная сложность — одновременная работа протокола доверия к датчику на каждом сенсоре и централизованного адаптивного классификатора сценариев требует резервирования вычислительных мощностей;

— неопределенность трактовки МППСС-72 — окончательное признание «электронного глаза» и «электронного уха» эквивалентом человеческого наблюдения остается предметом международного обсуждения.

Тем не менее полученные результаты определяют направление развития нормативной базы: предлагаемая архитектура может служить технической основой для интерпретации Правила 5 при сертификации автономных судов.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование направлено на разрешение фундаментального противоречия между классическими методами слияния сенсорных данных и требованиями полностью автономной навигации: традиционные подходы рассматривают датчик как источник с известной статистической ошибкой, но не учитывают возможность целенаправленной деградации, кибератак и контекстной недостоверности информации.

Впервые предложена архитектура ситуационной осведомленности, в которой требования Правила 5 МППСС-72 («постоянное наблюдение с помощью всех имеющихся средств») формализованы как императив неотключаемости базового сенсорного ядра. Показано, что адаптация к условиям плавания должна реализовываться не коммутацией датчиков, а динамическим взвешиванием их данных при сохранении физической непрерывности измерений. Разработан формальный аппарат, впервые вводящий различие отказов, деградации и внешних воздействий на уровне протокола соединения датчиков.

Предложена гибридная модель классификатора навигационных сценариев, которая на основе детекторов освещенности, видимости, плотности движения и условий плавания назначает доверительные веса сенсорам в реальном времени.

Новизна подхода заключается в использовании метаосведомленности (осведомленности системы о собственных состояниях) для параметрической настройки фильтров Калмана. Для соблюдения Правила 5 МППСС-72 для судна четвертого уровня автономности предложены формальная архитектурная спецификация и концептуальная модель наблюдения с использованием принципа «неотключаемого базового ядра» и адаптивного взвешивания. Таким образом, в работе предложена также обоснованная архитектура ССО, в которой доверие к сенсору становится управляемым ресурсом, а не априорным допущением. Это позволяет перейти от парадигмы «обработки данных» к парадигме «управления восприятием», что является необходимым условием для безопасной эксплуатации полностью автономных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dominguez, C.* Can SA be defined? / C. Dominguez, M. Vidulich, E. Vogel, & G. McMillan (Eds.) // *Situation awareness: Papers and annotated bibliography* (Wright-Patterson AFB AL/CF-TR 1994–0085) — OH: Armstrong Laboratory. — 1994. — Pp. 5–15.
2. *Fracker M. L.* A Theory of Situation Assessment: Implications for Measuring Situation Awareness / M. L. Fracker // *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. — 1988. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 102–106. DOI: 10.1177/154193128803200222.
3. *Endsley M. R.* Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement / M. R. Endsley // *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. — 1988. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 97–101. DOI: 10.1177/154193128803200221.
4. *Endsley M. R.* Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. / M. R. Endsley // *Human Factors*. — undefined. — T. 37. — № 1. — С. 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.
5. *Alamoush A. S.* Drivers, opportunities, and barriers, for adoption of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) / A. S. Alamoush, A. I. Ölçer, F. Ballini // *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*. — 2024. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 2411183. DOI: 10.1080/25725084.2024.2411183.

6. Астреин В. В. Навигационные системы и методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции / В. В. Астреин, В. И. Филатов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1(61). — С. 131–144. — EDN KKPXLN. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013.

7. Водяхо А. И. Вычислительные модели когнитивных систем мониторинга / А. И. Водяхо, Н. А. Жукова, Н. В. Климов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–3(42). — С. 147–153. — EDN YXUNOH.

8. Sanfilippo F. A multi-sensor fusion framework for improving situational awareness in demanding maritime training / F. Sanfilippo // Reliability Engineering & System Safety. — 2017. — Vol. 161. — Pp. 12–24. DOI: 10.1016/j.res.2016.12.015.

9. Hoehner F. Scenario-Based Sensor Selection for Autonomous Maritime Systems: A Multi-Criteria Analysis of Sensor Configurations for Situational Awareness / F. Hoehner, V. Langenohl, O. el Moctar, T. E. Schellin // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — Vol. 13. — Is. 10. DOI: 10.3390/jmse13102008.

10. Li X. Multi-source Data Fusion for Real-time Cybersecurity Situational Awareness and Visualization / X. Li, J. Zhang // Journal of Cyber Security and Mobility. — 2025. — Vol. 14. — Is. 04. — Pp. 955–980. DOI: 10.13052/jcsm2245–1439.1448.

REFERENCES

1. Dominguez, C., M. Vidulich, E. Vogel and G. McMillan (Eds.). “Can SA be defined?” *Situation awareness: Papers and annotated bibliography (Wright-Patterson AFB AL/CF-TR 1994–0085)*. OH: Armstrong Laboratory, 1994: 5–15.

2. Fracker, M. L. “A Theory of Situation Assessment: Implications for Measuring Situation Awareness.” *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting 32.2* (1988): 102–106. DOI: 10.1177/154193128803200222.

3. Endsley, M. R. “Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement.” *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting 32.2* (1988): 97–101. DOI: 10.1177/154193128803200221.

4. Endsley, M. R. “Toward a theory of situation awareness in dynamic systems.” *Human Factors* 37.1 (undefined): 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.

5. Alamoush, A. S., A. I. Ölçer and F. Ballini. “Drivers, opportunities, and barriers, for adoption of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS).” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 8.4 (2024): 2411183. DOI: 10.1080/25725084.2024.2411183.

6. Astrein, V. V. and V. I. Filatov. “Navigation systems and methods for improving their reliability and accuracy to solve problems of collision avoidance of an autonomous ship at the stage of concept development.” *Marine Intelligent Technologies* 3–1(61) (2023): 131–144. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013.

7. Vodyakho, A. I., N. A. Zhukova, N. V. Klimov et al. “Computational models of cognitive monitoring systems.” *Marine Intelligent Technologies* 4–3(42) (2018): 147–153.

8. Sanfilippo, F. “A multi-sensor fusion framework for improving situational awareness in demanding maritime training.” *Reliability Engineering & System Safety* 161 (2017): 12–24. DOI: 10.1016/j.res.2016.12.015.

9. Hoehner, F., V. Langenohl, O. el Moctar and T. E. Schellin. “Scenario-Based Sensor Selection for Autonomous Maritime Systems: A Multi-Criteria Analysis of Sensor Configurations for Situational Awareness.” *Journal of Marine Science and Engineering* 13.10 (2025). DOI: 10.3390/jmse13102008.

10. Li, X. and J. Zhang. “Multi-source Data Fusion for Real-time Cybersecurity Situational Awareness and Visualization.” *Journal of Cyber Security and Mobility* 14.04 (2025): 955–980. DOI: 10.13052/jcsm2245–1439.1448.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Астреин Вадим Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: astrein-vadim@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Astrein, Vadim V. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral F. F. Ushakov State
Maritime University
93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: astrein-vadim@rambler.ru

Кондратьев Сергей Иванович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: mail@nsma.ru

Филатов Виктор Иванович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93.
E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Kondratiev, Sergey I. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral F. F. Ushakov State
Maritime University
93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: mail@nsma.ru

Filatov, Victor I. —

PhD in Technical Sciences, assistant Professor
Admiral F. F. Ushakov State Maritime University
93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 12 февраля 2026 г.

Received: Feb 12, 2026

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВКИ ОТКРЫТЫХ СКЛАДСКИХ ПЛОЩАДОК ПОРТОВ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А. В. Галин, Д. В. Гольдинов

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

Настоящая статья посвящена актуальной проблеме оптимизации планировки открытых складских площадок для контейнеров и генеральных грузов портов Северного морского пути. Предложена расчетная модель, направленная на максимизацию вместимости склада с учетом геометрических параметров грузовых мест, технологических проездов и ограничений нагрузки на покрытие. Модель, реализованная в формате электронных таблиц с поддержкой исполняемых программных модулей (макросов), включает учет параметров грузовых мест: длины, ширины, массы, допустимой нагрузки и предназначена для оптимизации размещения штабелей груза с варьированием количества грузовых мест по длине и ширине штабелей. Рассматриваются два варианта компоновки складской площадки: «продольный» (размещение грузовых мест длинной стороной вдоль длинной стороны земельного участка размещения склада) и «поперечный» (размещение грузовых мест широкой стороной вдоль длины участка). Приведены формулы преобразования произвольных прямоугольных участков к стандартной форме для расчетов. На примере 20-футовых контейнеров показано, что оптимальная вместимость склада не всегда достигается при максимальной длине и ширине штабелей, размещаемых на складе, что подтверждает необходимость проведения точных расчетов. Модель полезна для проектирования новых и оптимизации существующих складов генеральных грузов и контейнеров, особенно в портах Северного морского пути с ограниченной инфраструктурой. Модель имеет ряд ограничений и упрощений (однородность грузов, прямоугольная форма участков расположения складов), которые задают направления для дальнейшего развития, включая работу с многоугольными площадками и разнотипными грузами. На основе проведенного исследования сформулированы выводы об эффективности модели и оптимальности компоновок складов.

Ключевые слова: контейнерный терминал, оптимизация склада, Северный морской путь, математическое моделирование, генеральные грузы, транспортная артерия, годовой грузооборот, статистика, финансовые вложения, эффективная перегрузка.

Для цитирования:

Галин А. В. Разработка модели для оптимизации планировки открытых складских площадок портов Северного морского пути / А. В. Галин, Д. В. Гольдинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 204–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-204-215. — EDN CVYHCZ.

MODEL DEVELOPMENT FOR OPTIMIZATION OF THE LAYOUT OF OPEN STORAGE AREAS OF NORTHERN SEA ROUTE PORTS

A. V. Galin, D. V. Goldinov

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

This paper is devoted to the current problem of optimization of the layout of open storage areas for containers and general cargo of Northern Sea Route ports. A computational model aimed at maximizing storage capacity taking into account the geometric parameters of cargo units, technological aisles, and pavement load constraints is proposed. The model, implemented in the form of a spreadsheet with executable modules (macros), includes the parameters of cargo units (length, width, weight, permissible load) and is intended to optimize the placement of cargo stacks by varying the number of cargo units along the length and width of the stacks. Two layout variants of the storage area are considered: “longitudinal” (placement of cargo units with the long side along the long

side of the storage site) and “transverse” (placement of cargo units with the wide side along the length of the site). Formulas for transforming arbitrary rectangular plots into a standard form for calculations are presented. Using the example of 20-foot containers, it is shown that optimal storage capacity is not always achieved with maximum stack length and width placed in the storage area, which confirms the need for precise calculations. The model is useful for the design of new and optimization of existing storage areas for general cargo and containers, especially in Northern Sea Route ports with limited infrastructure. The model has a number of limitations and simplifications (homogeneity of cargo, rectangular shape of storage area plots), which define directions for further development, including the use of polygonal plots and different types of cargo. Based on the results of the study, conclusions are drawn regarding the effectiveness of the model and the optimality of storage area layouts.

Keywords: container terminal, storage layout optimization, Northern Sea Route, mathematical modeling, general cargo.

For citation:

Galín, Aleksandr V. and D. V. Goldinov. “Model development for optimization of the layout of open storage areas of northern sea route ports.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 204–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-204-215.

Введение (Introduction)

Северный морской путь (СМП) продолжает оставаться одной из наиболее перспективных транспортных артерий современной Российской Федерации. Важность этого маршрута подтверждается существенным ростом объема годовых грузооборотов с середины 2010-х гг. до настоящего времени. Например, автор статьи [1] приводит статистику грузооборота СМП, согласно которой начиная с 2015–2016 гг. отмечается стремительный рост грузооборота с 5–7 млн т в год до почти 35 млн т в год в 2022 г. Динамика изменения грузооборота по СМП соответствует данным статьи [1]. Пандемия 2020 г. и санкции 2022 г. оказали некоторое влияние на этот грузопоток, но он все еще имеет очень высокие значения.

В 2024 г. по СМП прошел самый большой в истории этого транспортного маршрута контейнеровоз Flying Fish 1 (ледовый класс — ICE 1, длина — 294 м, осадка — 12,3 м, грузовая вместимость — 4843 TEU). В этом же году китайская транспортная компания NewNew Shipping Line в лице ее представителя Кэ Цзинь сообщила, что совместно с «Ростатомом» была открыта контейнерная линия, проходящая по СМП. Суда компании совершили 13 рейсов и перевезли 20 тыс. TEU за 2024 г.

Контейнеры являются одним из перспективных видов груза для транспортировки по Северному морскому пути. Это подтверждается заинтересованностью и реальными финансовыми вложениями не только со стороны Российской Федерации, но и со стороны зарубежных инвесторов. Так, например, в 2023 г. дочернее предприятие госкорпорации «Росатом» — «Русатом Карго» — и российское дочернее предприятие международного оператора контейнерных терминалов Dubai Ports World и DP World Russia FSE — зарегистрировали совместное предприятие в Москве под названием ООО «Международная контейнерная логистика» с уставным капиталом 960 млн руб. по данным Единого государственного реестра юридических лиц (ЕГРЮЛ). В январе 2023 г., согласно данным, доступным в ЕГРЮЛ, рост уставного капитала совместного предприятия составил 960 млн руб. до около 2,6 млрд руб. Такая активность доказывает актуальность транспортировки контейнеров по СМП. Необходимо также организовать эффективную перегрузку грузовых мест в начальной и конечной точке маршрута СМП. Для этого совместное предприятие «Русатом Карго» и Dubai Ports World планируют строительство одного контейнерного терминала в г. Мурманске (ООО «Западный транспортно-логистический узел») и одного контейнерного терминала на Дальнем Востоке РФ (предположительно в г. Владивостоке).

Во многих современных исследованиях рассматриваются проблемы строительства и развития морских портов в Арктической зоне. Так, например, в 2023 г. опубликовано исследование [2], авторы которого отмечают, что модернизация арктических портов требует внедрения технологий «умного порта» — автоматизации процессов, цифровизации логистики и использования Интернета вещей (IoT) для мониторинга процессов перегрузки.

Авторы исследования [3] отмечают, что транзитные контейнерные порты-хабы играют ключевую роль в повышении эффективности судоходства по СМП, обеспечивая перегрузку товаров с одного судна на другое в специально оборудованных портах. Геополитические и экономические факторы определяют развитие портов в Арктике: Россия стремится укрепить свою инфраструктуру, несмотря на санкции и геополитическую нестабильность, а климатические изменения и сокращение площади ледяного покрова делают СМП более привлекательным для судоходства. Однако при этом необходимо учитывать риски, связанные с суровыми погодными условиями и навигационной безопасностью.

В статье [4], опубликованной в 2023 г., авторы анализируют эффективность портов СМП с помощью метода анализа охвата данных (Data Envelopment Analysis, DEA) и индекса производительности Мальмквиста (Malmquist Index, MI). На основе результатов проведенного анализа авторы делают выводы о том, что порты СМП (например, Мурманск и Варандей) демонстрируют наибольшую эффективность и стабильный рост, в то время как эффективность таких портов, как Архангельск, Нарьян-Мар, Онега и Хатанга существенно ниже из-за нерационального использования причалов и существенной невостребованной длины причальной стенки. Кроме того, к причинам низкой эффективности портов относятся нерациональное использование техники персонала, а также сезонные ограничения навигации.

В отечественной научной литературе вопросы эффективности эксплуатации СМП и его портов стоят особенно остро. Например, автор статьи [5] предлагает методику планирования перевозок и выгрузки контейнеров во внепортовых условиях, что особенно актуально для портов СМП, поскольку портовая инфраструктура в этих регионах развита достаточно слабо. Автор работы [5] отмечает, что регулярный северный (экспедиционный) завоз является особой подсистемой перевозок, обеспечивающих жизнедеятельность удаленных пунктов в Арктической зоне. В статье рассматриваются три технологические схемы перегрузки контейнеров в условиях отсутствия полноценной портовой инфраструктуры: выгрузка с использованием плашкоутов, выгрузка вертолетами и применением саморазборных понтонов (лихтеров). Предлагаемая в статье методика позволяет определить наиболее эффективную схему на основе комплексного показателя для каждого конкретного случая перегрузки.

Авторы исследования [6] ставят в качестве цели разработку метода выбора оптимальных судоходных маршрутов в акватории СМП для обеспечения круглогодичной навигации. Авторы предлагают метод многокритериальной оценки альтернативных маршрутов, учитывающий такие критерии, как безопасность, время перехода, глубина, толщина льда и гидрографическая изученность. Результаты этого исследования показали, что более южные маршруты позволяют судам преодолеть акваторию СМП быстрее, но более северные маршруты являются более безопасными при наличии льда. При толщине льда 100 см и 200 см использование судов с ледовым классом Arc4 невозможно, а суда класса Arc7 могут использоваться только под проводкой ледоколов. Отмечается, что для круглогодичной навигации необходимо строительство новых судов, развитие навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, а также создание единой сети информационно-измерительных комплексов.

Помимо общих вопросов эффективности портов и транспортных маршрутов в Арктической зоне России необходимо уделить внимание задаче, предлагаемой к рассмотрению в данной статье, а именно оптимизации размещения генеральных грузов или контейнеров на открытой складской площадке морского порта, т. е. вместимости (проектной или оперативной) открытой площадки. В статье [7] авторы предлагают математическую модель для оптимизации планировки складских штабелей на складах автоматизированных контейнерных терминалов с так называемой «перпендикулярной» конфигурацией (штабели контейнеров располагаются перпендикулярно линии кордона причальной стенки). В модели учитывается количество рядов, ярусов и секций. Помимо геометрических параметров учитывается время цикла работы автоматизированных контейнеровозов (Automated Straddle Carriers, ASC), а также предлагается гибридный имитационно-аналитический подход для учета взаимных помех между ASC для повышения реалистичности оценки контейнеропотоков склада.

Авторы статьи [8] предлагают смешанную целочисленную нелинейную модель (Mixed Integer Non-Linear Programming Model, MINLP) для оптимизации использования складской территории на контейнерном терминале, учитывающей два типа штабелей: эксклюзивные (для конкретных грузоотправителей) и общие (динамически используемые всеми судами). Модель направлена на максимизацию дохода за счет сокращения потерь от неэффективных перестановок контейнеров и поддержания высокого уровня заполнения каждого штабеля контейнерами. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что при недостаточном количестве штабелей контейнеров (например, 10 ед.) возникают дополнительные расходы, в то время как оптимальная конфигурация (разбивка склада на 20 штабелей) минимизирует простои оборудования.

В обзорной статье [9] выполнен системный анализ более 600 статей, опубликованных за период 20 лет, из которых выделены 75 наиболее релевантных работ по темам управления складскими площадями, автоматизированным оборудованием и интеграции планирования операций на контейнерных терминалах. Проанализированные авторами исследования разделены на четыре основных кластера: управление пространством (например, назначение слотов для хранения контейнеров на складе), работа автоматизированных перегружателей и транспортных средств, интегрированное планирование операций, управление терминалами в целом.

Все рассмотренные исследования в той или иной степени сфокусированы на оптимизации работы именно автоматизированных контейнерных терминалов. Под автоматизацией в данном случае понимается использование перегрузочного оборудования, работающего в автоматическом режиме, без постоянного участия человека в качестве оператора. Такие технологии являются перспективными, однако с трудом или малоприменимы на контейнерных терминалах в портах СМП (из-за погодных условий) и на терминалах обработки генеральных грузов (из-за большой вариативности характеристик грузовых мест).

В данном исследовании предлагается расчетная модель, которая может применяться в описанных условиях как на терминалах генгрузов, так и на контейнерных терминалах. В частности, рассматривается одно из возможных направлений оптимизации открытых складских площадок морских портов, закладываемое еще в период проектирования объекта, но имеющее большое значение во время эксплуатации портов.

Целью исследования является формирование модели оптимизации открытой складской площадки для максимизации вместимости. Открытая складская площадка может использоваться для хранения генеральных грузов или контейнерных грузов. К задачам исследования относятся формулировка математической модели, реализация модели в редакторе электронных таблиц, проведение серии расчетов на модели, описание результатов моделирования и формирование выводов на основе этих результатов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Модель разработана в формате листа электронных таблиц с поддержкой макросов. Основные параметры и переменные модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры модели оптимизации открытой складской площадки

Table 1

Main parameters of the optimization model for an open storage area

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Описание
Длина грузового места	a	м	Задается пользователем
Ширина грузового места	b	м	Задается пользователем
Масса грузового места	m	т	Задается пользователем
Расстояние между грузовыми местами по длине	Δ_a	м	Задается пользователем
Расстояние между грузовыми местами по ширине	Δ_b	м	Задается пользователем

Таблица 1
(Окончание)

Ширина поперечного проезда между штабелями	A	м	Ширина проезда между штабелями по длинной стороне грузовых мест
Ширина продольного проезда между штабелями	B	м	Ширина проезда между штабелями по широкой стороне грузовых мест
Ширина проезда между ограждением площадки и штабелями	L	м	Ширина проезда по периметру складской площадки
Допустимая нагрузка на покрытие	q	т / м ²	Задается пользователем
Высота складирования грузовых мест	h	ярусов	Зависит от заданной допустимой нагрузки на покрытие и характеристик грузовых мест. Формула неприменима для контейнеров из-за особенностей распределения нагрузки на фитинги
Количество грузовых мест по длине штабеля	N_a	Ед.	Варьируемый моделью параметр
Количество грузовых мест по ширине штабеля	N_b	Ед.	Варьируемый моделью параметр
Координаты точек прямоугольного участка склада	(x_i, y_i)	—	Задается пользователем
Координаты точек приведённого прямоугольного участка склада	(x_{pi}, y_{pi})	—	Рассчитываются моделью
Координаты точек зоны складирования	(x_{li}, y_{li})	—	Рассчитываются моделью
Координаты точек приведённой зоны складирования	(x_{ri}, y_{ri})	—	Рассчитываются моделью
Длина штабеля груза	$L_{шт}$	м	Рассчитываются моделью
Ширина штабеля груза	$B_{шт}$	м	Рассчитываются моделью
Количество штабелей груза по длине складской площадки	$N_{L.шт}$	Ед.	Рассчитываются моделью
Количество штабелей груза по ширине складской площадки	$N_{B.шт}$	Ед.	Рассчитываются моделью
Вместимость открытой площадки хранения грузов	E	Ед. грузовых мест	Рассчитываются моделью (критерий оптимальности)

На рис. 1 приведены основные параметры грузовых мест и штабелей, используемые в модели. Длина одного грузового места задаётся параметром a , ширина — параметром b . Расстояния между грузовыми местами внутри штабеля составляют Δ_a и Δ_b , м. Ширина поперечного проезда между штабелями задается параметром A , ширина продольного проезда — параметром B .

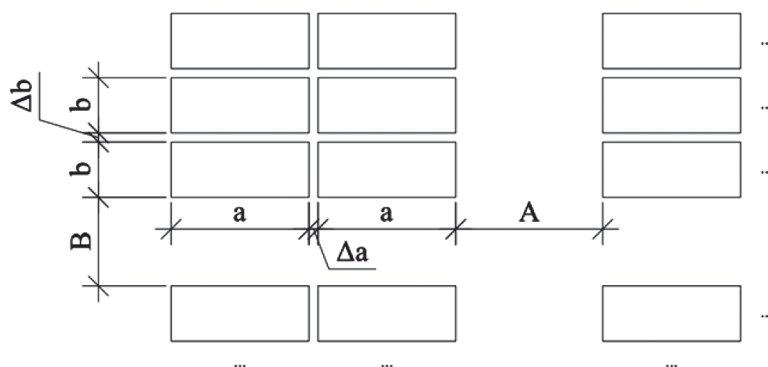


Рис. 1. Основные геометрические параметры грузовых мест и штабелей
Fig. 1. Main geometric parameters of cargo units and stacks

Высота складирования грузовых мест определяется либо исходя из массы одного грузового места m и допустимой нагрузки на покрытие площадки q — для грузовых мест с равномерным распределением массы по площади, занимаемой грузовым местом, либо на основе рекомендуемых показателей (например, на основе рекомендаций Норм технологического проектирования морских портов¹). В случае генеральных грузов с равномерно распределенной нагрузкой по площади грузового места применяется следующая формула для определения высоты складирования:

$$h = [q / (m / (a \cdot b))]. \quad (1)$$

В модели рассматриваются только складские площадки, расположенные на прямоугольных участках территории. Это допущение сделано для упрощения поставленной задачи. В реальности участки земли, выделяемые под открытые складские площадки, обычно имеют произвольную форму в плане. Оптимизация размещения грузовых мест на складских площадках произвольной формы является одним из потенциально перспективных направлений развития модели. Тем не менее в модели учитывается возможное произвольное размещение прямоугольного участка в плане. На первом шаге работы модели определяется приведенный прямоугольник на основе произвольно расположенного прямоугольного участка. Одна из вершин этого прямоугольника расположена в точке $(0, 0)$, а его стороны находятся вдоль осей OX и OY .

Для определения координат точек приведенного участка склада используются приведенный далее алгоритм. На первом шаге прямоугольник переносится так, чтобы точка (x_{p0}, y_{p0}) приведенного прямоугольника находилась в точке $(0; 0)$:

$$x_{pi} = x_i - x_0; \quad y_{pi} = y_i - y_0. \quad (2)$$

На втором шаге производится поворот прямоугольника так, так чтобы он располагался вдоль осей OX и OY . Это достигается при расчете координат точек прямоугольника по следующим формулам:

$$x_{p1} = \sqrt{(x_{p1} - x_{p0})^2 + (y_{p1} - y_{p0})^2}; \quad (3)$$

$$y_{p1} = 0; \quad x_{p3} = 0; \quad (4)$$

$$y_{p3} = \sqrt{(x_{p3} - x_{p0})^2 + (y_{p3} - y_{p0})^2}; \quad (5)$$

$$x_{p2} = x_{p1}; \quad y_{p2} = y_{p3}. \quad (6)$$

Для складирования грузов может быть использован не весь земельный участок. Обычно на открытых складских площадках, особенно на площадках для контейнеров, организовывается проезд по периметру склада. Ширина этого проезда (L , м) задается пользователем. Модель закладывает отступ от границ прямоугольного участка, равный ширине проезда по периметру склада. Груз может располагаться только внутри результирующего доступного для склада участка.

Для определения координат доступного для складирования участка используются следующие формулы:

$$x_{i0} = x_{p0} + L;$$

$$y_{i0} = y_{p0} + L;$$

$$x_{i1} = x_{p1} - L;$$

$$y_{i1} = y_{p1} + L;$$

$$x_{i2} = x_{p2} - L;$$

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стадартинформ, 2018. 218 с.

$$y_{l2} = y_{p2} - L;$$

$$x_{l3} = x_{p3} + L;$$

$$y_{l3} = y_{p3} - L.$$

На третьем шаге приведения прямоугольника к координатам, с которыми будет работать модель, производится смещение доступного для складирования участка в точку с координатами (0, 0). Для этого используются те же формулы, которые использовались на первом шаге приведения прямоугольного участка:

$$x_{ri} = x_{li} - x_{l0};$$

$$y_{ri} = y_{li} - y_{l0}.$$

В результате из произвольного участка территории прямоугольной формы модель получает прямоугольный участок, внутри которого можно располагать грузовые места. Этот участок перемещен в точку (0, 0) и повернут так, чтобы стороны участка располагались вдоль осей OX и OY . Размеры полученного приведенного участка учитывают необходимость организации технологического проезда по периметру складкой площадки. Примеры произвольного прямоугольного участка территории, предназначенного для размещения складской площадки и приведенного участка, показаны на рис. 2.

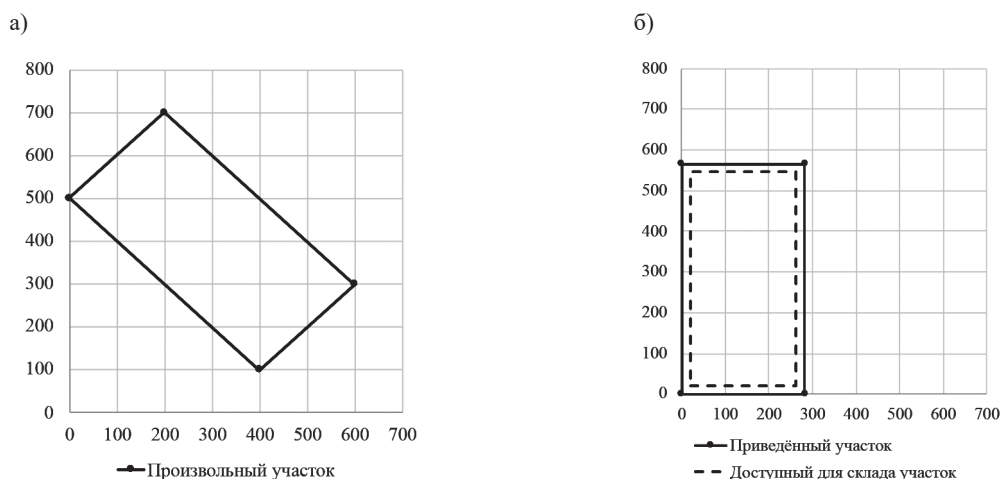


Рис. 2. Пример территориальных участков для размещения открытого склада в модели:
а — произвольный прямоугольный участок; б — приведенный участок для работы модели

Fig. 2. Example of site plots for the placement of an open storage area in the model:

(a) arbitrary rectangular plot; (b) transformed plot for model application

Рассчитав координаты приведенного участка, на котором располагается открытый склад, модель размещает контейнеры или другие заданные грузовые места согласно двум вариантам: «продольный» и «поперечный». *Вариант 1* — «продольное» размещение грузовых мест — подразумевает размещение грузовых мест в штабелях длинной стороной вдоль длинной стороны прямоугольного участка склада. *Вариант 2* — «поперечное» размещение грузовых мест — подразумевает размещение грузовых мест в штабелях широкой стороной вдоль длинной стороны прямоугольного участка склада.

Длины сторон складской площадки определяются на основе координат точек приведенного прямоугольника:

$$L_x = x_{r1} - x_{r0};$$

$$L_y = y_{r3} - y_{r0}.$$

Груз на площадке размещается в штабелях. Длина $L_{шт}$ и ширина $B_{шт}$ штабеля определяется по следующим формулам для варианта 1 («продольное» расположение грузовых мест):

$$L_{шт} = N_a A + \Delta_a (N_a - 1);$$

$$B_{шт} = N_b B + \Delta_b (N_b - 1).$$

При расчете по варианту 2 («поперечное» расположение грузовых мест) длина и ширина штабеля определяются по следующим формулам:

$$L_{шт} = N_b B + \Delta_b (N_b - 1);$$

$$B_{шт} = N_a A + \Delta_a (N_a - 1).$$

Количество штабелей по длине и по ширине складской площадки определяется по формулам:

$$N_{L_{шт}} = L_x / (B_{шт} + B);$$

$$N_{B_{шт}} = L_y / (L_{шт} + A).$$

После выполнения всех описанных ранее шагов определяется вместимость площадки (E) в единицах грузовых мест. Для этого используется следующая формула:

$$E = (N_{L_{шт}} N_{B_{шт}}) (N_a N_b h).$$

В качестве варьируемых параметров в модели выступают величины N_a и N_b — количество грузовых мест по длине и по ширине штабеля. Эти параметры могут изменяться в пределах, заданных пользователем с шагом 1 ед.

Результаты (Results)

Для расчетов на модели предлагается рассмотреть открытую площадку хранения контейнеров на примере порта Мурманск, являющегося западным логистическим узлом СМП. Исходные данные о размерах грузовых мест и расстояниях между ними:

- длина 20-футового морского контейнера a — 6,058 м;
- ширина 20-футового морского контейнера b — 2,438 м;
- высота штабелирования, средняя h — четыре-пять ярусов;
- расстояние между контейнерами в штабеле по длине Δ_a — 0,4 м;
- расстояние между контейнерами в штабеле по ширине Δ_b — 0,4 м;
- ширина продольного проезда между штабелями B — 20 м;
- ширина поперечного проезда между штабелями A — 25 м;
- количество контейнеров по длине штабеля N_a — 10–16 контейнеров;
- количество контейнеров по ширине штабеля N_b — 4–6 контейнеров;
- ширина проезда по периметру площадки L — 20 м.

Координаты точек прямоугольного участка территории, на котором планируется размещение контейнерного склада, приведены в табл. 2. Координаты такого прямоугольного участка совпадают с прямоугольным участком (см. рис. 2, а).

Таблица 2

Координаты точек участка для размещения склада контейнеров

Table 2

Coordinates of plot vertices for container storage area placement

Точки прямоугольного участка	x_i	y_i
Точка 0	400	100
Точка 1	600	300
Точка 2	200	700
Точка 3	0	500

После выполнения шагов для приведения участка к обрабатываемой моделью форме получены координаты результирующего участка, приведенные в табл. 3, откуда видно, что этот участок имеет длину $L_x = 526$ м и ширину $L_y = 243$ м.

Таблица 3

Координаты точек приведенного участка для размещения склада контейнеров

Table 3

Coordinates of vertices of the transformed plot for container storage area placement

Точки прямоугольного участка	x_{ri}	y_{ri}
Точка 0	0	0
Точка 1	243	0
Точка 2	243	526
Точка 3	0	526

Модель выполняет расчеты и формирует таблицу, в которой указываются все возможные комбинации количества контейнеров по длине N_a и ширине N_b штабелей, а также вариант размещения контейнеров на площадке («продольный» или «поперечный»). Результаты работы модели с заданными параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования

Table 4

Simulation results

Количество грузовых мест по длине штабеля, контейнеров	Количество грузовых мест по ширине штабеля, контейнеров	Вместимость контейнеров	Вариант
N_a	N_b	E	—
10	4	8473	1
11	4	7957	2
12	4	8473	1
13	4	9180	1
14	4	9886	1
15	4	8473	1
10	5	9702	1
11	5	9284	2
12	5	9702	1
13	5	10511	1
14	5	11319	1
15	5	9852	2
10	6	10741	1
11	6	10345	2
12	6	10741	1
13	6	11636	1
14	6	12531	1
15	6	10978	2
16	6	11457	1
Оптимальный вариант на основе вместимости			
14	6	12531	1

Модель определяет оптимальный вариант на основе максимального значения вместимости складской площадки. В случае примера, приведенного в табл. 4, оптимальная компоновка открытого склада контейнеров достигается при 14 контейнерах в штабеле по длине, шести контейнерах в штабеле по ширине и при размещении контейнеров длинной стороной вдоль длинной стороны участка территории.

Обсуждение (Discussion)

В представленном в предыдущем разделе статьи примере рассматривается оптимизация открытой складской площадки, заполняемой 20-футовыми морскими контейнерами. Значение количества контейнеров по ширине штабеля N_b от четырех до шести контейнеров выбрано не случайно. В практике проектирования контейнерных терминалов ширина штабеля, равная четырем контейнерам, считается оптимальной для обеспечения эффективной работы при помощи погрузчиков с телескопической стрелой (ричстакеров) с учетом необходимости так называемой «копки», т. е. поиска контейнеров в штабеле. Ширина штабеля, равная шести контейнерам, увеличивает количество непроизводительных операций при копке ричстакерами. Значения больше шести контейнеров по ширине одного штабеля могут рассматриваться моделью, но они не рекомендованы с точки зрения эффективности технологической схемы.

Вместимость склада при оптимальной компоновке найденной с использованием предлагаемой модели составляет около 12,5 тыс. контейнеров. При этом максимальной вместимости можно добиться при не максимальных значениях N_a и N_b . При максимальных рассмотренных значениях $N_a = 16$ и $N_b = 6$ вместимость склада составит около 11,5 тыс. контейнеров, что на 8 % ниже вместимости при оптимальной компоновке. Это демонстрирует, что даже при прямоугольной форме площадки в плане размещение максимального количества контейнеров по длине и ширине в штабелях не гарантирует оптимальной компоновки открытого склада.

Заключение (Conclusions)

Модель оптимизации планировки на примере открытой складской площадки порта Мурманск, являющегося западным транспортно-логистическим узлом СМП, предложенная в настоящем исследовании, выполняет роль вспомогательного инструмента при проектировании открытых складских площадок генеральных грузов или контейнеров. Также она может применяться при поиске оптимального способа размещения генеральных грузов / контейнеров на существующих открытых площадках.

Модель, выполненная с учетом предложений, сформулированных в работах [10, 11], имеет следующие ограничения:

- возможно рассмотрение только прямоугольных участков территории для размещения склада;
- размещаемые на складе грузовые места должны быть однородными с точки зрения своих геометрических характеристик.

Данные ограничения являются перспективными в следующих направлениях развития модели:

- разработка алгоритмов работы с многоугольными территориальными участками произвольной формы;
- добавление возможности размещения нескольких видов грузов на одном открытом складе.

Работоспособность модели продемонстрирована на примере определения оптимальной вместимости открытой площадки хранения контейнеров в порту Мурманск. Рассмотренный пример показывает, что максимизация длины и ширины штабеля с целью занять как можно больше территории для хранения контейнеров или других грузовых мест не всегда приводит к максимизации вместимости площадки хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексушин Г. В. Развитие атомного ледокольного флота и его роли в экономическом освоении Северного морского пути / Г. В. Алексушин // Арктика и Север. — 2023. — № 53. — С. 28–35. — EDN KAMGIN. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2023.53.28.
2. Makarova I. The Construction of Seaports in the Arctic: Prospects and Environmental Consequences / I. Makarova, P. Buyvol, E. Mukhametdinov, A. Boyko // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 10. DOI: 10.3390/jmse11101902.
3. Hermann R. R. Arctic transshipment hub planning along the Northern Sea Route: A systematic literature review and policy implications of Arctic port infrastructure / R. R. Hermann, N. Lin, J. Lebel, A. Kovalenko // Marine Policy. — 2022. — Vol. 145. — Pp. 105275. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105275.
4. Zakharova I. A study on port efficiency in the Russian Arctic as a key factor for trade growth in the Northern Sea Route / I. Zakharova, H-S. Lee // Korea Trade Review. — 2023. — Vol. 48. — Is. 4. — Pp. 121–148. DOI: 10.22659/ktra.2023.48.4.121.
5. Горенькова В. С. Методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях / В. С. Горенькова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 74–83. — EDN KANMEE. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.
6. Андреева Е. В. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 191–199. — EDN VWMHSK. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.
7. Kong L. Mathematical modeling and optimizing of yard layout in automated container terminals / L. Kong, M. Ji // Expert Systems with Applications. — 2024. — Vol. 258. — Pp. 125117. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125117.
8. Wirjodirdjo B. Container yard planning layout model considering demand and lost sale container / B. Wirjodirdjo, A. G. Budianto, I. N. Pujawan, I. Maflahah // Proceedings of the 2020 2nd international conference on management science and industrial engineering 2020. — С. 314–318.
9. Yu H. Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review / H. Yu, Y. Deng, L. Zhang, X. Xiao, C. Tan // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. DOI: 10.3390/su14063419.
10. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2(30). — С. 141–153. — EDN TPSXEF. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.
11. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. — EDN TRJAZE. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

REFERENCES

1. Aleksushin, G. V. “The nuclear icebreaker fleet and its role in the economic development of the northern sea route”. *Arctic and North* 53 (2023): 28–35. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2023.53.28.
2. Makarova, I., P. Buyvol, E. Mukhametdinov and A. Boyko. “The Construction of Seaports in the Arctic: Prospects and Environmental Consequences.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.10 (2023). DOI: 10.3390/jmse11101902.
3. Hermann, R. R., N. Lin, J. Lebel and A. Kovalenko. “Arctic transshipment hub planning along the Northern Sea Route: A systematic literature review and policy implications of Arctic port infrastructure.” *Marine Policy* 145 (2022): 105275. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105275.
4. Zakharova, I. and H-S. Lee. “A study on port efficiency in the Russian Arctic as a key factor for trade growth in the Northern Sea Route.” *Korea Trade Review* 48.4 (2023): 121–148. DOI: 10.22659/ktra.2023.48.4.121.
5. Goren'kova, V. S. “Methodology for planning transportation and containerized cargo unloading in off-port conditions.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 74–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.

6. Andreeva, E. V. and A. L. Tezikov. "Search for optimal shipping routes in the arctic seas." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.
7. Kong, L. and M. Ji. "Mathematical modeling and optimizing of yard layout in automated container terminals." *Expert Systems with Applications* 258 (2024): 125117. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125117.
8. Wirjodirdjo, B., A. G. Budianto, I. N. Pujawan and I. Maflahah. "Container yard planning layout model considering demand and lost sale container." *Proceedings of the 2020 2nd international conference on management science and industrial engineering*. 2020: 314–318.
9. Yu, H., C. Tan et al. "Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review." *Sustainability* 14.6 (2022). DOI: 10.3390/su14063419.
10. Kuznetsov, A. L. and A. V. Galin. "Genezis modeley razvitiya portov v sovremennoy transportnoy nauke." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.
11. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and G. B. Popov. "Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Гольдинов Данил Вадимович — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: goldinoff91@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Goldinov, Danil V. — Postgraduate
Supervisor:
Galin, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: goldinoff91@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01 декабря 2025 г.

Received: Dec. 1, 2025

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Л. Н. Тындыкарь

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

Темой исследования является поиск инструментов для обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации подъемно-транспортного оборудования, которое требует внедрения эффективных методов диагностики и автоматизированных систем контроля его технического состояния. Отмечается, что ремонт по фактическому состоянию на основе прогноза остаточного ресурса является экономически и технически целесообразной стратегией. Целью исследования является обоснование выбора методов вибродиагностики в качестве основы для построения систем автоматического мониторинга и управления техническим состоянием вращающихся узлов подъемно-транспортного оборудования. В работе представлен сравнительный анализ методов неразрушающего контроля. Основное внимание уделено вибродиагностике как предиктивному методу, позволяющему по отклонениям виброакустических сигналов выявлять развитие типовых дефектов (дисбаланс, расцентровка, повреждения подшипников и зубчатых передач). Проведен анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы по вопросам вибродиагностики; определены источники вибрации на подъемно-транспортном оборудовании; выделены факторы, влияющие на его техническое состояние. Отмечается, что для анализа полученных виброакустических данных формируется перечень параметров диагностируемого объекта и решающих правил. Приведены доказательства того, что установка решающих правил по выбору параметров позволяет определить вид дефекта и прогноз наработки до отказа. Рассмотрены современные инструменты анализа виброакустических данных и возможность интегрирования систем вибромониторинга в контуры автоматизированного управления технологическими процессами и производствами. Показана целесообразность использования вибродиагностики для автоматизированной оценки состояния критически важных узлов подъемно-транспортного оборудования.

Ключевые слова: подъемно-транспортное оборудование, вибродиагностика, ремонты по техническому состоянию, техническое состояние, детали и узлы, двигатель внутреннего сгорания, преобразование Фурье, нейронные сети.

Для цитирования:

Зуб И. В. Анализ методов вибродиагностики для механизмов подъемно-транспортного оборудования / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 216–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-216-231. — EDN DPALGM.

ANALYSIS OF VIBRATION DIAGNOSTIC METHODS FOR MECHANISMS OF LIFTING AND TRANSPORT EQUIPMENT

I. V. Zub, Yu. E. Ezhov, L. N. Tyndykar

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

The study is devoted to the search for tools to ensure safe and failure-free operation of lifting and transport equipment, which requires the implementation of effective diagnostic methods and automated systems for monitoring its technical condition. It is noted that condition-based maintenance based on the prediction of residual life is an economically and technically feasible strategy. The purpose of the study is to substantiate the choice of vibration diagnostic methods as a basis for the development of automated monitoring and control systems for the technical condition of rotating units of lifting and transport equipment. The paper presents a comparative analysis of non-destructive testing methods. Particular attention is paid to vibration diagnostics as a predictive method that makes

it possible to detect the development of typical defects (imbalance, misalignment, bearing and gear faults) based on deviations of vibroacoustic signals. An analysis of domestic and foreign scientific and technical literature on vibration diagnostics is carried out; sources of vibration in lifting and transport equipment are identified; factors affecting its technical condition are determined. It is noted that for the analysis of the obtained vibroacoustic data, a set of parameters of the diagnosed object and decision rules is formed. It is shown that the establishment of decision rules for parameter selection makes it possible to determine the type of defect and predict the time to failure. Modern tools for analyzing vibroacoustic data and the possibility of integrating vibration monitoring systems into automated process control systems and production systems are considered. The expediency of using vibration diagnostics for automated assessment of the condition of critical units of lifting and transport equipment is demonstrated.

Keywords: lifting and transport equipment, vibration diagnostics, condition-based maintenance, technical condition, components and assemblies, internal combustion engine, Fourier transform, neural networks.

For citation:

Zub, Igor V., Yu. E. Ezhov and L. N. Tyndykar. "Analysis of vibration diagnostic methods for mechanisms of lifting and transport equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): x216–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-216-231.

Введение (Introduction)

Обеспечение безопасной и безаварийной эксплуатации требует поиска и совершенствования инструментов и методов оценки технического состояния подъемно-транспортного оборудования (ПТО). В процессе эксплуатации оборудование переходит из одного технического состояние в другое. Изменение технического состояния связано с износом и разрушением поверхностного слоя деталей, вследствие чего нарушается работоспособность и в некоторых случаях возникает необходимость проведения аварийных ремонтов. Предотвращение аварийных ситуаций возможно при проведении диагностических мероприятий, которые проводятся в период технического обслуживания или при постоянном мониторинге технического состояния. По полученной диагностической информации прогнозируется остаточный ресурс, позволяющий принимать решение о проведении ремонта по техническому состоянию. Ремонт ПТО по техническому состоянию, когда высока вероятность выхода из строя, является экономически и технически целесообразным, так как детали или агрегаты полностью вырабатывают свой ресурс.

Диагностика механического оборудования может осуществляться путем визуального внешнего осмотра, замера геометрических размеров деталей, анализа виброакустических сигналов или тепловых полей. Для анализа полученных данных формируется перечень параметров диагностируемого объекта и решающих правил выбора параметров характеризующих техническое состояние диагностируемого объекта. Информацию о техническом состоянии оборудования можно получить различными средствами дистанционного диагностирования, которых имеется достаточное количество. Одним из требований при выборе таких средств является простота их использования эксплуатирующим персоналом.

Для регистрации дефектов на оборудовании устанавливаются системы непрерывного мониторинга (*Condition Monitoring Systems, CMS*), которые можно разделить на следующие укрупненные группы: вибродиагностика, системы акустической эмиссии, системы контроля нагрузки и веса, системы мониторинга целостности конструкции, термографические системы, системы мониторинга износа тормозных систем и футеровок. Все эти системы позволяют в режиме реального времени регистрировать параметры, косвенно или прямо свидетельствующие о зарождении и развитии дефектов.

В современной практике обеспечения промышленной безопасности и эксплуатационной надежности ПТО одним из эффективных методов мониторинга является вибродиагностика [1], как наиболее распространенный способ проверки технического состояния вращающихся узлов, таких как редукторы, двигатели, подшипниковые узлы, барабаны.

Колебания механизмов фиксируются в широком частотном диапазоне, позволяя выявлять дисбаланс, расцентровку, повреждения подшипников качения и зубчатых зацеплений, что имеет

особое значение при мониторинге механизмов подъема и передвижения ПТО. Данные начальных вибраций в некоторых случаях снимают с механизмов на специальных стендах [2], однако это при мониторинге оборудования в процессе эксплуатации может искажать полученные данные из-за влияния вибраций стоящих рядом механизмов.

Вибрационный контроль оборудования позволяет не только своевременно выявить возникновение дефекта, но и дает информацию о тенденциях изменения контролируемых параметров во времени [3]. Техническое состояние оборудования в вибродиагностике определяется виброакустическим сигналом, который включает информацию о колебательных процессах (вибрационных, гидро- или газодинамических и др.) и акустическом шуме механизма, мгновенно реагируя на изменение контролируемого параметра [4]. Для количественной оценки информации, полученной таким методом, устанавливаются граничные зоны параметров и требования к порогу чувствительности средств вибродиагностики [5].

Вибродиагностика как метод неразрушающего контроля позволяет оценить состояние технического объекта по отклонению виброакустических показателей, которые зависят от технического состояния его деталей и узлов.

Применение систем вибродиагностики позволяет:

- выявить дефекты и вероятность их возникновения, что дает возможность принимать превентивные меры по предотвращению развития дефектов, предотвратив тем самым аварийные ситуации;
- обеспечить экономический эффект путем перехода на проведение ремонтов по техническому состоянию.

Целью работы является обоснование выбора методов вибродиагностики для оценки технического состояния ПТО и рассмотрение возможности применения современных технологий для анализа виброакустических данных.

Для достижения поставленной цели в работе реализованы следующие задачи:

- определены источники вибрации на ПТО;
- рассмотрены методы вибродиагностики, применяемые к ПТО;
- выделены факторы, влияющие на техническое состояние ПТО;
- рассмотрены современные инструменты анализа виброакустических данных.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методы вибродиагностики. Данные методы позволяют обеспечивать мониторинг технического состояния ПТО, что способствует предотвращению аварийных ситуаций. Наряду с положительными аспектами в вибродиагностике имеются также недостатки, основными из которых являются зависимость вибрационных параметров от большого количества факторов, а также сложность выделения вибрационного сигнала, свидетельствующего о неисправности конкретной детали или механизма [6]. На одном ПТО каждый механизм будет иметь свой сигнал:

$$x(t) = \cos(2\pi H_{z1}t) + \cos(2\pi H_{z2}t) + \dots + \cos(2\pi H_{zn}t), \quad (1)$$

где $H_{z1}, H_{z2}, \dots, H_{zn}$ — частота амплитуды колебаний механизмов ПТО.

Если $H_{z1}, H_{z2}, \dots, H_{zn}$ — постоянные во времени, то сигнал стационарен. При частотном анализе таких сигналов не требуется временная информация — все частоты не изменяются в сигнале на протяжении всего времени его действия.

Процесс измерения вибрации определяется на основе измеренного базового сигнала, основанного на распространении энергии вибрации. При измерении вибрации используется значение среднеквадратичной динамической амплитуды, записываемое в виде

$$A = \int_0^T x(t)^2 dt. \quad (2)$$

Эффективность распространения энергии вибрации H зависит от амплитуды $x(t)$ и силы воздействия $F(t)$:

$$H = \frac{\int_0^T x(t)^2 dt}{\int_0^T F(t)^2 dt} . \quad (3)$$

Распространение энергии вибрации можно представить во временной и частотных областях:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df . \quad (4)$$

Таким образом, можно определить энергию вибрации в частотной области. Тогда уравнение (2) примет вид

$$H(f) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |F(f)|^2 df} , \quad (5)$$

где $X(f)$ — спектральная плотность мощности сигнала; $F(f)$ — спектральная плотность мощности сигнала; f — частота, Гц [7].

Вибросигнал реагирует мгновенно на изменение технического состояния ПТО что позволяет идентифицировать дефект и принять решение о техническом воздействии [4]. Данные, полученные вибродиагностическим методом, используются для определения технического состояния контролируемых механизмов и деталей. Точность определения дефекта зависит от наличия таких факторов, как воздействие внешних условий, шум и повреждение диагностического оборудования.

Вибрация пар трения, агрегатов и механизмов возникает из-за воздействия сил возбуждения, которые могут быть *внешними* или *внутренними*. Вибрационный анализ выявляет эти силы по их направлению, возбуждению и направлению. Силы возбуждения зависят от характеристик взаимодействующих деталей (частота поверхностного слоя, форма и модуль упругости детали). При работе на неустановившемся режиме работы механизмов ПТО проведение вибродиагностики не дает точных результатов. Виброакустический метод имеет погрешность до 10 %, поэтому наряду с вибродиагностикой используют также другие методы определения технического состояния.

Прочность и остаточный ресурс оборудования обеспечиваются несовпадением собственных частот виброакустических частот с рабочим диапазоном действующих внешних нагрузок. Для предотвращения явления резонанса производят оценку вероятности его возникновения и при ее наличии изменяют геометрию металлоконструкции и некоторых ее параметров или механизмов. Агрегаты и узлы, установленные на ПТО, можно разделить на следующие виды:

- роторные (насосы, турбоагрегат двигателя внутреннего сгорания, редуктора, гидромоторы, электродвигатели);
- возвратно-поступательные (двигатель внутреннего сгорания, гидроцилиндры);
- металлоконструкции;
- подшипники качения;
- подшипники скольжения.

Методы акустической диагностики базируются на спектральных характеристиках и статистических моделях, однако они не всегда достаточно информативны, поскольку при эксплуатации ПТО, на которых установлены различные механизмы и агрегаты, преобладают составные акустические сигналы.

Методы диагностики редукторов (роторных механизмов). В крановом оборудовании, которое составляет основу парка ПТО, одними из наиболее широко распространенных механизмов являются редукторы. Основными деталями изделия редуктора являются зубчатые колеса или валы-шестерни, валы и подшипники. При изготовлении и сборке редуктора должны соблюдаться допуски форм и геометрических размеров, а также необходимо производить флакирование зубьев

для плавного зацепления. Однако даже при соблюдении всех допусков зубчатое зацепление обладает высокой виброактивностью.

Возникающие дефекты поверхности зубьев увеличивают генерацию вибрационных волн, отрицательно влияют на другие работающие механизмы. При обработке полученной информации используются статические методы, метод ударных импульсов, резонансный метод [8]. Вибрационные воздействия оказывают негативное влияние на металлоконструкции и детали. В результате таких воздействий происходит ослабление крепежа неподвижных разъемных соединений, появляются усталостные трещины в деталях.

При работе двух и более механизмов одновременно возможно возбуждение нескольких резонансных режимов при совпадении частоты вибрации с собственными резонансными частотами редуктора. Виброускорения, возникающие при работе редукторов, создают дополнительные динамические нагрузки, увеличивают износ деталей, негативно воздействуют на организм человека [9].

При диагностике планетарных редукторов используют параметры величин износа и бокового зазора зубьев. Исследуемый частотный диапазон вибраций сокращается более чем на два порядка по сравнению с анализом зубцовых гармоник. Износ зубьев и бокового зазора на частоте совпадения максимальных значений вибраций зубчатых колес является наиболее эффективным диагностическим признаком, а величина частоты совпадения вибрации зубьев определяется по следующему соотношению [10]:

$$B_{\text{ЧСЗ}} = \frac{f_z M}{Z_1 Z_2}, \quad (6)$$

где f_z — частота зубцовой гармоники пары; M — наибольший общий множитель в числах зубьев зубчатой пары; Z_1, Z_2 — соответственно число зубьев шестерни и колеса.

Вибродиагностика редукторов и других зубчатых передач позволяет определить начало образования дефекта, что способствует переходу на ремонт по техническому состоянию. Вибрация зубчатой пары зависит от развития дефектов, при этом возникают дискретные составляющие вибрационного спектра сигнала. Вибрационный сигнал может возникать также при отсутствии дефекта. Из-за погрешности в сборке вход зубьев в зацепление сопровождается ударом.

Погрешность изготовления и деформации зубьев при эксплуатационных нагрузках определяет разностную скорость вхождения зубьев в зацепление V_o . Износ и контактное выкрашивание зубьев изменяют шаг зацепления зубьев, что приводит к изменению амплитуды и формы ударного импульса, который определяет уровень виброакустической активности зубчатой передачи [11]. Амплитуда ударных сигналов в начальный период незначительна в силу малой энергии ударов, такие частоты слабо различимы на фоне шумовых сигналов вибрации. При этом необходимо идентифицировать зубцовые гармоники исправного редуктора.

По мере развития дефекта возрастает энергия ударов, что отражается на росте амплитуды вибрационных гармоник. Многоступенчатые редукторы генерируют сложный нестационарный вибрационный сигнал, в который входят сигналы от всех контактирующих поверхностей контактирующих зубчатых пар. Кроме того, из-за малой энергоемкости вибрационных сигналов, их идентификация затруднена и требуется использование сложных аналитических методов. Вибрационный сигнал можно выразить по аналогии с гармоническим колебательным процессом формулой [12]

$$a(t) = A(t) \cos(\omega(t)t + \varphi(t)) - A(t) \cos \psi(t), \quad (7)$$

где A — амплитуда; ω — частота; φ — начальная фаза; ψ — полная фаза высокочастотного колебания.

Параметры в формуле (7) могут изменяться по времени, что приводит к импульсной модуляции, модель которой можно выразить через аппроксимированную формулу

$$A(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega_0 t, \quad (8)$$

При отсутствии дефекта датчики могут показывать виброколебания, которые вызваны погрешностью допустимой при изготовлении зубчатого колеса. Модуляция сигнала усиливается при зарождении дефекта, при приближении к критическому происходит резкое возрастания коэффициента K_m , который находится по формуле

$$K_m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \quad (9)$$

где $A_{\max}$, $A_{\min}$ — соответственно максимальная и минимальная амплитуды модулированного сигнала, м/с².

Подшипники качения используют практически во всех механизмах. От технического состояния подшипников зависит работоспособность механизмов. Вибродиагностика позволяет получать информацию о техническом состоянии подшипников в режиме реального времени. Согласно полученным данным вибродиагностики определяют вероятность возникновения дефектов с последующим определением остаточного ресурса подшипника. В процессе эксплуатации рабочие поверхности подшипников, как и других деталей, подвержены изнашиванию.

В зависимости от эксплуатационных параметров: нагрузки, скорости вращения, наличия в нем смазочного материала и абразивных частиц, на поверхностях беговых дорожек и тел качения могут развиваться окислительное и абразивное изнашивание, а также усталостное выкрашивание, приводящее к ускоренному увеличению зазоров. Осевой и радиальный зазоры необходимы для функционирования подшипника и имеют величины, заданные им при изготовлении.

При установке подшипника в рабочее положение различают следующие три вида радиального зазора: начальный, посадочный и рабочий. Как увеличение, так и понижение радиального зазора негативно влияют на работоспособность механизма и могут привести к аварийной ситуации. Значение зазора можно рассчитать путем пересчета виброускорения в виброскорость и виброперемещение, если допустить, что в сигнале присутствует гармоника только одной частоты, а в качестве частоты при расчетах используют частоту вращения вала. Величину зазора d подшипника, работающего в сопряжении с валом, можно рассчитать по следующей зависимости:

$$d = \frac{a \cdot 1000}{\left(f_0 \left(\frac{1}{c}\right)\right)^2}, \quad (10)$$

где a — виброускорение (мм/с²); f_0 — угловая частота вала (Гц); коэффициент 1000 в формуле используется для перевода единиц измерения из миллиметров в микрометры для корректного определения зазоров [13].

Рассмотренные ранее дефекты имеют различные диагностические признаки, выявляемые на следующих частотах [14]:

$$f_{\text{нар}} = k \frac{z}{2} n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right); \quad (11)$$

$$f_{\text{вн}} = k \frac{z}{2} n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right); \quad (12)$$

$$f_{\text{тк}} = k \frac{d}{2D} n \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2 \beta\right); \quad (13)$$

$$f_c = k \frac{n}{2} \left[1 - \frac{(d \cos \beta)}{D}\right]; \quad (14)$$

$$f_{\text{неп}} = kn. \quad (15)$$

где $f_{нар}, f_{вн}, f_{тк}, f_c, f_{пер}$ — частоты, возникающие в подшипнике в повреждениях, соответственно, в наружном кольце, внутреннем кольце, в теле качения, сепараторе, при перекосе подшипника; $k = 1, 2, 3$ — соответственно при перекосе подшипника, при износе наружного кольца, при трещинах и раковинах на наружном кольце; n — частота вращения; D — диаметр окружности, проходящей через центр тел качения; z — число тел качения; d — диаметр тел качения; β — угол контакта.

Определение основных правил позволяет обнаружить и определить вид дефекта и определить прогноз наработки до отказа. Уровень вибрации в осевом направлении превышает уровень остальных замеров (причиной данного явления может быть сопротивление вращению). Гармонические составляющие колебаний генерируются контактирующими поверхностями качения. При уменьшении скорости вращения уровень вибрации увеличивается, что указывает на изменение положения тел качения в подшипниковом узле [15].

Методы оценки технического состояния ДВС. Такое ПТО как ричстакеры, терминальные тягачи и козловые краны на пневмоходу (RTG) имеют двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Виброакустическими методами также можно производить оценку технического состояния ДВС, но для этого необходимо найти способы получения данных о вибрации и их оперативной обработке.

Метод вибродиагностики ДВС связан с динамическими процессами распространения колебаний по корпусу двигателя. Определение собственных частот ДВС является одной из задач вибродиагностики деталей и механизмов [16, 17]. Для эффективности вибродиагностики в работе [18] предлагается использовать стробоголографический метод, который зависит от синхронизации лазерного излучения с фазой исследуемого вибрационного процесса. При съемке стробоголограмм время регистрации обусловлено величиной скважности стробирующих импульсов $I_{ст}$:

$$I_{ст} = \frac{T}{\tau} = \frac{2\pi}{\omega\tau}; \quad t_p = \frac{n\pi}{\omega}, \quad (16)$$

где T — период колебаний; τ — длительность стробирующего импульса; π — число периодов колебаний за время регистрации; ω — частота вибраций.

При синхронизации величина вибрации для любой частоты остается неизменной что обеспечивает поддержание синхронизация стробирующих импульсов с моментами амплитудных отклонений поверхности вибрирующего ДВС. При изменении параметров ДВС изменятся их виброакустические сигналы. Причиной изменения параметров деталей и узлов могут быть износ, коррозия, выкрашивание, волнистость, задиры, поверхностные разрушения, усталостные раковины, глубокие трещины.

Критериями, принятыми для измерения вибрационных характеристик элементов ДВС являются [19]:

- измеряемые величины: перемещение S (мкм), пиковое значение виброперемещения $S_{пик}$:

$$s = S_{пик} \sin(2\pi \frac{1}{T}) = S_{пик} \sin(2\pi f) = S_{пик} (\omega t); \quad (17)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; t — время.

- скорость v , мм/с, пиковое значение виброскорости $v_{пик}$:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega S_{пик} \cos(\omega t) = V_{пик} \cos(\omega t) = V_{пик} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); \quad (18)$$

- ускорение a , м/с², пиковое значение виброускорения $a_{пик}$:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{ds^2}{dt^2} = -\omega^2 S_{пик} \sin(\omega t) = -a_{пик} \sin(\omega t) = a_{пик} \sin(\omega t + \pi); \quad (19)$$

- среднеквадратичное значение (СКЗ), характеризующее амплитуду вибрации:

$$X_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}, \quad (20)$$

где T — период колебания.

Виброперемещение $S_{СКЗ}$, виброскорость $v_{СКЗ}$, виброускорения $a_{СКЗ}$ в стандартных единицах связаны уравнениями:

$$v = 2\pi f s = \frac{a 10^3}{2\pi}; \quad s = \frac{v}{2\pi f} = \frac{a 10^3}{2\pi f}; \quad a = (2\pi f)^2 s 10^3 = 2 f v 10^3. \quad (21)$$

Амплитуда вибросмещения характеризует деформацию металлоконструкции при вибрации. Уровень вибрационных напряжений σ и виброскорость v взаимосвязаны зависимостью [20]:

$$\sigma v = \alpha v, \quad (22)$$

где α — коэффициент пропорциональности, зависящий от технических характеристик системы.

При работе ДВС в зависимости от нагрузки изменяются вибросигналы, которые возникают:

– в кривошипно-шатунном механизме — от зазоров в шатунных и коренных подшипниках коленчатого вала;

– в цилиндропоршневой группе — от зазоров между поршнем и стенкой цилиндра, от зазоров в кепках — между поршнем и кольцами.

– в газораспределительном механизме — от зазоров в подшипниках распределительного вала, зазоров в направляющей втулки клапана и толкателем, а также от тепловых зазоров между коромыслом и толкателем клапана [17];

– в турбокомпрессоре — от разрушения лопаток, повреждения подшипников и нарушения герметичности уплотнений.

При выходе двигателя на границу устойчивости можно определить явления, предшествующие помпажу, который сопровождается:

– повышением уровня вибрации;

– уменьшением частоты вращения ротора [21].

Помпаж представляет процесс колебания давления в турбокомпрессоре, нагрузка на валу двигателя будет колебаться, в потоке появятся высшие гармоники или колебания его амплитуды, которые можно фиксировать. Виброакустические сигналы в турбокомпрессоре — это шум работы турбины и компрессора. Во время вращения турбина и колесо периодически захватывают порцию отработавших газов или воздуха с частотой (Гц):

$$f = \frac{n\omega}{60}, \quad (23)$$

где n — количество лопаток турбины или компрессора, шт.; ω — частота вращения турбины, об/мин.

Каждой частоте турбокомпрессора соответствует своя определенная форма и частота колебаний. Наибольший интерес представляет резонансная кривая, рассчитываемая по формуле [22]:

$$\delta = \frac{\pi \Delta f}{f_p}, \quad (24)$$

где δ — декремент колебаний; Δf — ширина резонансной кривой при уровне вибронпряжений 0,707 от резонансного; f_p — резонансная частота.

Физическая природа помпажа связана с нарушением согласованности потока газа и с геометрией проточной части компрессора. Когда расход газа через компрессор снижается ниже критического значения, происходит срыв потока с лопаток рабочего колеса, что приводит к резкому падению напора компрессора и возникновению обратного тока газа.

При помпаже появляется неустойчивый режим работы турбокомпрессора, возникают колебания потока воздуха в турбокомпрессоре, в потоке будут появляться высшие гармоники или колебания его амплитуды, которые приводят к аварийной ситуации. При помпаже периодические колебания давления в проточной части двигателя происходят с различной частотой и большой амплитудой. Форма колебаний, как при срыве потока, так и при помпаже, носит релаксационный характер.

В определенный момент времени подача воздуха компрессором почти прекращается. Помпаж сопровождается динамическими напряжениями и вибрацией всех элементов силовой установки в целом [21–23]. В данной работе не рассматривается гидравлический удар, возникающий в цилиндрах, поскольку последствиями этого гидравлического удара будет, возможно, разрушение ДВС.

Методы диагностики гидравлических элементов. Гидравлические системы широко используются на различном ПТО. Диагностика гидравлических элементов проводится на стенде, и на основе полученных диагностических данных разрабатываются регламенты по их техническому обслуживанию. В процессе эксплуатации в гидравлических системах возникают дефекты, которые можно обнаружить средствами вибродиагностики. Причинами вибрационных сигналов могут быть различные дефекты гидронасосов: турбулентный поток жидкости, зазоры, загрязнение, изменение параметров узлов, погрешности сборки. Следовательно, сигналы будут находиться в разных частотных диапазонах и в каждом диапазоне характер вибраций будет разный. В ходе вибродиагностики при обнаружении дефекта увеличивается уровень вибраций, что свидетельствует о предаварийном состоянии. Одна из причин возникновения ударных нагрузок — явление гидравлического удара. Внешние воздействия в этом случае влияют на изменение скорости рабочей жидкости (РЖ) и сопровождаются возникновением волн в гидросистеме.

В зависимости от скорости закрытия гидрораспределителя ($V_{з.гр}$) возникает гидроудар, проявляющийся в колебательном процессе изменения давления в потоке рабочей жидкости, если при закрытии гидрораспределителя не срабатывает перепускной клапан (некорректная настройка, заклинивание золотника), при условии:

$$P_{гс} + \Delta P < P_{пк},$$

где $P_{гс}$ — давление в гидравлической системе; ΔP — приращение давления; $P_{пк}$ — давление настройки перепускного клапана.

Если время на прохождение рабочей жидкости расстояния $t_{гр}$ до гидрораспределителя меньше, чем время на повышения давления $t_{пд}$ до давления настройки перепускного клапана, то произойдет гидроудар. Гидроудар может произойти также при неисправности перепускного клапана. Еще одной причиной появления вибрации является кавитация. Явление кавитации возникает, если давление внутри насоса опускается ниже давления насыщенных паров. Из-за этого нарушается термодинамический баланс, что приводит к стремительному «закипанию» рабочей жидкости и образованию пустот (они заполнены газом или паром). Под действием центробежной силы рабочая жидкость с пузырьками газа или пара перемещается в зону нагнетания, где давление более высокое, и пузырьки «схлопываются», образуя ударную волну.

Причины кавитации насосов, приводящие к вибрации:

- эксплуатация насоса в режимах, значительно отличающихся от номинальных (перегрузка или недогрузка);
- резкие изменения направления потока, недостаточно плавные переходы или острые кромки лопастей, которые приводят к появлению локальных зон пониженного давления;
- износ компонентов насоса — увеличение зазоров, эрозия поверхностей, приводящая к нарушению равномерности потока и созданию условий для кавитации.

Наличие газовой составляющей в рабочей жидкости ухудшает динамические характеристики гидравлической системы, приводит к снижению производительности ПТО и точности позиционирования груза. Кроме того, снижаются свойства рабочей жидкости, что приводит к повышенному износу поверхностей трения деталей гидравлической системы.

Процесс возникновения кавитации начинается с образования отдельных пузырьков каверн в вихревых зонах потока и на участках пограничного слоя обтекаемых поверхностей. При понижении давления в потоке до определенной величины, при которой происходит вскипание РЖ, образовавшиеся пузырьки газа и пара вместе с потоком поступают в область высокого давления, где происходит конденсация пара, и газовые пузырьки сжимаются. Во время сжатия кавитационный пузырек захлопывается, образуя при этом ударную волну [24].

Результаты (Results)

Идентификация дефекта на ранней стадии возможна при анализе структуры сигнала. Вибрация пар трения не может возникать без приложения сил возбуждения, которые могут быть приложены к узлу трения извне или возникать внутри него.

Параметры вибрации — амплитуда, направление и частота — являются диагностическими признаками, позволяющими определить действующие силы возбуждения в условиях эксплуатации. Знание законов взаимодействия позволяет диагностировать дефекты пар трения. Соударение деталей пар трения являются источником колебаний. Частота колебаний зависит от размеров, форм и свойств материала. Независимо от физической природы виброакустики используются статистические методы.

При вибродиагностике источником информации служит сигнал $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, который содержит информацию о техническом состоянии диагностируемого узла. Развитие дефекта вызывает в виброакустическом сигнале рост числа и амплитуды кратковременных импульсов, модулирующих колебания на собственных частотах ПТО.

Эффективным методом анализа вибрационного сигнала является спектральный анализ, которым является преобразование Фурье [25]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2j\pi ft} dt; \quad (25)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{-2j\pi ft} df, \quad (26)$$

где t — время; f — частота; x — сигнал во временной области; X — сигнал в частотной области.

Формулы (25), (26) определяют две области представления сигнала: (25) — преобразование Фурье, (26) — обратное преобразование Фурье. Из формулы (26) видно, что в реальных условиях имеется ограничение по времени. Тогда спектр будет функцией, зависящей от частоты колебаний и интервала времени.

Следует отметить, что классическое преобразование Фурье неприменимо для анализа нестационарных сигналов, характерных для диагностики, так как оно не сохраняет временную локализацию событий. Вейвлет-анализ решает эту проблему, но зависит от субъективного выбора базисной функции. Адаптивным и более эффективным подходом является преобразование Гильберта – Хуанга, в котором базис извлекается непосредственно из данных. Его ключевое преимущество заключается в эмпирической декомпозиции сигнала на интуитивные физические составляющие — эмпирические моды, с последующим применением преобразования Гильберта к каждой компоненте для построения гильбертова спектра. Данный метод не опирается на априорно заданный базис, извлекая его непосредственно из структуры данных, что обеспечивает его высокую эффективность при анализе сложных сигналов реальных технических систем.

Контроль технического состояния ПТО по параметрам вибродиагностики позволяет выявить дефекты вне зависимости от стадии их развития. Погрешность точности вибродиагностики составляет около 10 %. Для прогнозирования технического состояния ПТО необходимо использование критериев предельных состояний.

Диагностическая информация может быть получена при анализе основных показаний виброакустического сигнала, к которым относятся максимальная амплитуда, среднеквадратические значения (СКЗ) виброскорости и виброускорения, относительно узкие частотные полосы, свидетельствующие о наличии дефектов однотипного характера.

Причины возникновения классифицируют по дефектам: изготовления, монтажа и нарушению правил технической эксплуатации. В узлах и механизмах часто сочетаются несколько дефектов:

$$П_{TC} = \alpha K_t + (1 - \alpha) П_{TC-1} = П_{TC-1} + \alpha (K_t - П_{TC-1}), \quad (27)$$

где $П_{TC}$ — прогноз технического состояния; α — параметр экспоненциального сглаживания; $П_{TC-1}$ — прогноз на один шаг вперед; $K_t - П_{TC-1}$ — погрешность прогноза $П_{TC-1}$.

Для записи параметрического ряда $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, формулу (27) представим в виде

$$\Pi_{TC} = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} \beta^i K_{i-1} + \beta^N \Pi_0, \quad (28)$$

где Π_0 — среднеарифметическое значение единого диагностического критерия; $\beta = 1 - \alpha$; N — число членов параметрического ряда.

Применение современных инструментальных средств анализа виброакустических данных. Для внедрения системы ремонта по техническому состоянию кроме вибродиагностики необходимо наличие программно-математических методов прогнозирования [26].

Наиболее эффективным методом обработки полученных данных является нейронная сеть (НС), которая используется для автоматического анализа виброакустических данных. НС настраивается путем обучения на характерные связи между входными и выходными параметрами. Преимущество НС заключается в том, что для нее не требуется каких-либо представлений о формировании вибраций в контролируемом объекте и больших вычислительных мощностей. НС проводит анализ и выполняет функции аналого-цифрового преобразователя [27, 28].

НС с контролируемым обучением демонстрируют высокую точность, при этом он сталкиваются с проблемой дисбаланса классов: данные, характеризующие нормальный режим работы, избыточны, в то время как примеры различных дефектов малочисленны и сложны для корректной разметки. В контексте обнаружения аномалий (дефектов) или прогнозирования методологически обоснованное решение представляют собой автокодировщики. Будучи обученными исключительно на данных, соответствующих «нормальному» состоянию системы, они формируют сжатое латентное представление (энкоддинг), позволяющее с минимальной ошибкой реконструировать входной сигнал. Для сигналов, соответствующих аномальному состоянию (дефекту), процесс реконструкции приводит к существенно большей ошибке, что является индикатором дефекта.

Программная реализация может быть выполнена на фреймворках глубокого обучения, таких как TensorFlow / Keras или PyTorch.

Обсуждение (Discussion)

Контроль технического состояния ПТО — один из аспектов обеспечения безопасности и конкурентоспособности сивидорной компании. Обеспечение постоянного мониторинга возможно при использовании методов неразрушающего контроля. Одним из таких методов является вибродиагностика, при этом он дает погрешность до 10 %.

При оценке технического состояния объекта погрешность приводит к ошибкам первого и второго рода, тем самым затрудняя оптимизацию допускаемых значений диагностического параметра. Методом минимального риска ошибки находят значение граничного диагностического параметра Z_0 [29]:

$$\frac{f\left(\frac{Z_0}{N_1}\right)}{f\left(\frac{Z_0}{N_2}\right)} = \frac{(L_{12} - L_{22})F_2}{(L_{21} - L_{11})F_1}, \quad (29)$$

где L_{11} , L_{22} — цены правильных решений; L_{12} — цена пропуска дефекта; L_{22} — цена ложной тревоги.

Цены ошибок диагностирования первого и второго рода определяются затратами в эксплуатации от возникновения отказа и затратами от неоправданной разборки; априорные вероятности F_1 и F_2 определяются по результатам диагностирования или замеров; статистические распределения плотности вероятности диагностируемого параметра для состояний N_1 и N_2 также определяются результатами диагностирования.

Оптимальное правило принятия решения об отнесении объекта диагноза к состоянию N_1 или N_2 при попадании диагностируемого параметра в зону неопределенности определяется из условия минимума суммарной ошибки:

$$L_1 f_{N_1} \left(\frac{Z_0}{N_1} \right) - L_2 f_{N_2} \left(\frac{Z_0}{N_2} \right) > 0 \Leftrightarrow Z_0 \in N_1; \quad (30)$$

$$L_1 f_{N_1} \left(\frac{Z_0}{N_1} \right) - L_2 f_{N_2} \left(\frac{Z_0}{N_2} \right) > 0 \Leftrightarrow Z_0 \in N_2, \quad (31)$$

где L_1 — цена ошибочного решения о принадлежности точки Z_0 к состоянию N_2 ; L_2 — цена ошибочного решения о принадлежности точки Z_0 к состоянию N_1 .

Использование нейронных сетей и методов математического моделирования для определения оптимальных значений диагностических параметров и технического состояния ПТО способствует оперативному определению межремонтного периода, что, в свою очередь, позволяет перейти к системе ремонтов по техническому состоянию.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование позволило обосновать выбор методов вибродиагностики в качестве ключевого инструмента для оценки технического состояния ПТО. На основе анализа требований к системам мониторинга установлено, что вибродиагностика, являясь методом неразрушающего контроля, наиболее полно отвечает задачам раннего обнаружения дефектов и прогнозирования остаточного ресурса критически важных вращающихся.

Основное преимущество вибродиагностики заключается в ее высокой чувствительности к развивающимся механическим повреждениям. Способность фиксировать колебания в широком частотном диапазоне и анализировать динамику изменения виброакустических сигналов во времени позволяет не только констатировать факт наличия дефекта, но и отслеживать тенденцию его развития, что является основой для проведения ремонта по фактическому техническому состоянию.

Целесообразность применения вибродиагностики обусловлена возможностью своевременного выявления дефектов на начальной стадии (в том числе определять степень их развития, устанавливать причину их возникновения), оптимизацией затрат на обслуживание (переход от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, основанному на данных вибромониторинга, который обеспечивает полную выработку ресурса деталей и узлов, сокращая избыточные ремонты и расходы на запасные части) и интегрируемостью в системы управления.

На техническое состояние ПТО оказывают влияние следующие факторы:

- условия эксплуатации: температура, влажность, загрязнения и режимы нагружения;
- характеристики деталей пар трения: свойство материала и частота обработки поверхностного слоя деталей;
- качество сборки узла или механизма.

Для корректной диагностики необходимо учитывать эти факторы и использовать компенсационные алгоритмы или проводить измерения в стандартизированных условиях. При снятии вибрационных характеристик на стенде после монтажа узла или механизма на ПТО вибрационные сигналы изменяются. Это связано с тем, что при работе оборудования на контролируемый вибросигнал оказывают влияние вибросигналы других механизмов.

Основной проблемой, требующей решения, является работа со сложными составными акустическими сигналами, характерными для реальных условий эксплуатации ПТО. Существующие спектральные и статистические модели не всегда обеспечивают достаточную информативность в таких условиях. Таким образом, вибродиагностика является мощным, но не абсолютным инструментом контроля состояния ПТО. Для повышения надежности и точности диагностических решений она должна применяться в комплексе с другими методами неразрушающего контроля.

Перспективным направлением научных и практических изысканий является развитие алгоритмов обработки сложных составных вибросигналов и интеграция вибродиагностики в системы комплексного технического мониторинга, учитывающие данные от различных датчиков и режимы

работы оборудования. Дальнейшее исследование целесообразно направить на разработку и обоснование определяющих норм для выбора параметров при вибродиагностике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахтулов А. Л. Применение вибродиагностики в условиях функционирования системы технического обслуживания и ремонта оборудования / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, А. В. Шимохин // Омский научный вестник. — 2012. — № 3(113). — С. 109–111. — EDN PJWFKX.
2. Болдовская Т. Е. Применение моделей машинного обучения для контроля качества вибродиагностических данных / Т. Е. Болдовская, И. В. Берсенов // Прикладная математика и фундаментальная информатика. — 2024. — Т. 11. — № 3. — С. 12–23. — EDN NKNKIFR. DOI: 10.25206/2311-4908-2024-11-3-12-23.
3. Брякин И. В. Измерительное устройство для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования / И. В. Брякин, И. В. Бочкарев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2023. — Т. 25. — № 2. — С. 137–152. — EDN BQJXZQ. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-137-152.
4. Герике Б. Л. Распознавание эксплуатационных дефектов ленточных конвейеров методами вибродиагностики / Б. Л. Герике, И. Л. Абрамов, П. Б. Герике // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № S8. — С. 290–294. — EDN KXTBXD.
5. Григорьев А. В. Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков [и др.] // Надежность и качество сложных систем. — 2020. — № 3(31). — С. 55–63. — EDN RMBVBJ. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.
6. Пивень В. В. Основные тенденции развития вибродиагностического неразрушающего контроля технических объектов / В. В. Пивень, Г. Ю. Гондуров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2015. — № 5(113). — С. 100–103. — EDN STDGCP. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-5-100-103.
7. Żółtowski M. Mutual measures of vibration process in differentiating examined construction state / M. Żółtowski // MATEC Web Conf. — 2017. — Vol. 107. — Pp. 00021. DOI: 10.1051/mateconf/201710700021.
8. Крючков А. Н. Вибродиагностика величины бокового зазора в зубчатом зацеплении дифференциального редуктора турбовинтового двигателя / А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // Вестник Московского авиационного института. — 2020. — Т. 27. — № 3. — С. 198–208. — EDN KTVOTQ. DOI: 10.34759/vst-2020-3-198-208.
9. Лукьянов А. В. Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики / А. В. Лукьянов, Е. В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2023. — № 2(78). — С. 115–126. — EDN NHGATF. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).115–126.
10. Сундуков А. Е. Частота совпадения зубьев в вибродиагностике технического состояния редукторов авиационных ГТД / А. Е. Сундуков, Е. В. Шахматов // Динамика и виброакустика. — 2024. — Т. 10. — № 3. — С. 93–98. — EDN LTPGOP. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-3-93-98.
11. Дакало Ю. А. Определение предельно допустимых уровней вибраций при вибродиагностике зубчатых приводов с учетом ремонтов / Ю. А. Дакало // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. — 2020. — № 4(122). — С. 62–66. — EDN BHHXYN.
12. Омель Д. В. Новые подходы в вибродиагностике многовальных зубчатых приводов / Д. В. Омель, А. В. Драган // Динамика и виброакустика. — 2020. — Т. 6. — № 1. — С. 14–24. — EDN BVAOVC. DOI: 10.18287/2409-4579-2020-6-1-14-24.
13. Ишметьев Е. Н. Автоматизированная система измерения зазоров в подшипниках качения / Е. Н. Ишметьев, Д. В. Чистяков, А. Н. Панов, Е. Э. Бодров // Электротехнические системы и комплексы. — 2017. — № 2(35). — С. 61–66. — EDN ZAXHOP. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-61-66.
14. Таджибаев А. И. Прогнозирование технического состояния подшипников качения на основе вибрационного анализа / А. И. Таджибаев, Н. Draganchev, В. С. Яровой [и др.] // Материаловедение. Энергетика. — 2021. — Т. 27. — № 3. — С. 77–85. — EDN FILCWE. DOI: 10.18721/JEST.27307.
15. Герике Б. Л. Спектральный метод вибродиагностики подшипниковых узлов карьерных экскаваторов / Б. Л. Герике, И. Л. Абрамов, П. Б. Герике // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2007. — № 3(61). — С. 7–9. — EDN IADGHP.

16. Злотин Г. Н. Анализ вибрационных свойств двигателя применительно к системам вибродиагностики механизма газораспределения / Г. Н. Злотин, К. И. Лютин // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2008. — № 6(44). — С. 8–11. — EDN KNVDXT.
17. Мягков Ю. В. Определение собственных частот и форм колебаний двигателя внутреннего сгорания / Ю. В. Мягков, Ю. С. Шипелов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2014. — № 3. — С. 217–220. — EDN SIKLBL.
18. Анацкий В. С. Совершенствовании строболографических методов вибродиагностики элементов дизельной генераторной установки / В. С. Анацкий // Инновационная наука. — 2020. — № 10. — С. 25–27. — EDN HKUCQN.
19. Герасиди В. В. Расширение действующих основ вибродиагностики судовых главных движителей морских судов / В. В. Герасиди // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 2–1(68). — С. 162–171. — EDN ZJPHJG. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.019.
20. Алексеева Т. В. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Банская, Т. М. Башта, В. И. Загребельный, Г. И. Зайончковский, С. В. Колосов — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
21. Токарев В. П. Система диагностирования предпомпажного состояния газотурбинного двигателя / В. П. Токарев, Д. Д. Кудашов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2014. — Т. 18. — № 1(62). — С. 73–78. — EDN SDHUFV.
22. Исинтаев Т. И. Исследование помпажа путем совершенствования конструкции стенда для испытания сельскохозяйственных турбокомпрессоров / Т. И. Исинтаев, Б. К. Калиев, А. М. Плаксин [и др.] // АПК России. — 2020. — Т. 27. — № 4. — С. 642–648. — EDN VKNNEJ.
23. Бурцев А. Ю. Исследование явления помпажа и процесса смазки ротора турбокомпрессора при его искусственном торможении / А. Ю. Бурцев, А. В. Гриценко, А. М. Плаксин, И. Ганиев // АПК России. — 2016. — Т. 23. — № 4. — С. 820–827. — EDN XEPAVL.
24. Зуб И. В. Кавитация в гидравлическом приводе перегрузочных машин / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Н. Н. Стенин // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: Сборник научных статей конференции, Санкт-Петербург, 20 сентября — 22 2021 года. Том 1. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2022. — С. 148–154. — EDN FHAIQZ.
25. Ступин О. А. Вибродиагностика как современный метод контроля и диагностирования гидроприводов технологических машин / О. А. Ступин, С. И. Некрасов, Р. Г. Кучинский // Международный технико-экономический журнал. — 2022. — № 5–6. — С. 75–86. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-76-87. — EDN SMEEFO.
26. Герике П. Б. Адаптивное прогностическое моделирование процессов деградации технического состояния генераторных групп карьерных экскаваторов на основе анализа параметров генерируемой при их работе вибрации / П. Б. Герике // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2015. — № 6(112). — С. 71–78. — EDN UYYWFI.
27. Лютин К. И. Вибродиагностика систем ДВС с использованием нейронных сетей / К. И. Лютин, В. Е. Федянов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. — 2007. — Т. 2. — № 8(34). — С. 88–90. — EDN KWENWJ.
28. Турянский А. М. Методы обработки акустических данных для выявления источников шума в автотранспорте с использованием нейронных сетей / А. М. Турянский, А. И. Солдатов // Перспективы науки. — 2025. — № 5(188). — С. 34–37. — EDN WHDIIA.
29. Чупахин А. В. Определение технического состояния объектов по результатам измерения косвенных структурных параметров при проведении предремонтного диагностирования / А. В. Чупахин, В. С. Чупахин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. — 2013. — № 1(36). — С. 125–127. — EDN PZDJWF.

REFERENCES

1. Akhtulov, A. L., L. N. Akhtulova and A. V. Shimokhin. “Application of vibrating diagnostics in conditions of functioning of maintenance and repair system of the equipment.” *Omsk Scientific Bulletin* 3(113) (2012): 109–111.

2. Boldovskaya, T. E. and I. V. Bersenev. "Application of machine learning models for quality control of vibrodiagnostic data." *Prikladnaya matematika i fundamental'naya informatika* 11.3 (2024): 12–23. DOI: 10.25206/2311-4908-2024-11-3-12-23.
3. Bryakin, I. V. and I. V. Bochkarev. "Measuring device for systems of technical vibro-diagnosis of power equipment." *Power Engineering: Research, Equipment, Technology* 25.2 (2023): 137–152. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-137-152.
4. Gerike, B. L., I. L. Abramov and P. B. Gerike. "Raspoznavanie ekspluatatsionnykh defektov lentochnykh konveyerov metodami vibrodiagnostiki." *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* S8 (2008): 290–294.
5. Grigor'ev, A. V., I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov et al. "Method for controlling the technical condition of moving mechanisms based on statistical analysis of vibration blurring images of a test object round form." *Reliability & Quality of Complex Systems* 3(31) (2020): 55–63. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.
6. Piven', V. V. and G. Yu. Gondurov. "The basic trends of development of vibrodiagnostic nondestructive testing of technical facilities." *Oil and Gas Studies* 5(113) (2015): 100–103. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-5-100-103.
7. Żółtowski M. "Mutual measures of vibration process in differentiating examined construction state." *MATEC Web Conf.* 107 (2017): 00021. DOI: 10.1051/mateconf/201710700021.
8. Kryuchkov, A. N., S. M. Plotnikov, A. E. Sundukov and E. V. Sundukov. "Vibration diagnostics of lateral clearance value in the toothed gearing of differential gearbox of a turboprop engine." *Aerospace Mai Journal* 27.3 (2020): 198–208. DOI: 10.34759/vst-2020-3-198-208.
9. Luk'yanov, A. V. and E. V. Kaimov. "Improving the reliability of auxiliary machines of electric locomotives based on the use of vibration diagnostics data." *Modern Technologies. System Analysis. Modeling* 2(78) (2023): 115–126. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).115–126.
10. Sundukov, A. E. and E. V. Shakhmatov. "Teeth matching frequency in vibration diagnostics of technical condition of aviation gas turbine engine gearboxes." *Journal of Dynamics and Vibroacoustics* 10.3 (2024): 93–98. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-3-93-98.
11. Dakalo, Yu. A. "Determination of the maximum permissible vibration levels during vibration diagnostics of gear drives taking into account repairs." *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Mechanical Engineering* 4(122) (2020): 62–66.
12. Omes', D. V. and A. V. Dragan. "New approaches in multi-shaft gear drives vibration diagnostics." *Journal of Dynamics and Vibroacoustics* 6.1 (2020): 14–24. DOI: 10.18287/2409-4579-2020-6-1-14-24.
13. Ishmet'ev, E. N., D. V. Chistyakov, A. N. Panov and E. E. Bodrov. "Automated system for rolling contact bearings clearance measurement." *Electrotechnical Systems and Complexes* 2(35) (2017): 61–66. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-61-66.
14. Tadzhibaev, A. I., H. Draganchev, V. S. Yarovoy et al. "Forecasting of the technical condition of rolling bearings based on vibration analysis." *Materials Science. Power Engineering* 27.3 (2021): 77–85. DOI: 10.18721/JEST.27307.
15. Gerike, B. L., I. L. Abramov and P. B. Gerike. "Spektral'nyy metod vibrodiagnostiki podshipnikovyykh uzlov kar'ernyykh ekskavatorov." *Bulletin of The Kuzbass State Technical University* 3(61) (2007): 7–9.
16. Zlotin, G. N. and K. I. Lyutin. "Analiz vibratsionnykh svoystv dvigatelya primenitel'no k sistemam vibrodiagnostiki mekhanizma gazoraspredeleniya." *Izvestia Volgograd State Technical University* 6(44) (2008): 8–11.
17. Myagkov, Yu. V. and Yu. S. Shipelov. "Definition of natural frequencies and mode shapes of ice." *Izvestiya Tula State University* 3 (2014): 217–220.
18. Anatskiy, V. S. "Sovershenstvovaniy strobolograficheskikh metodov vibrodiagnostiki elementov dizel'noy generatornoy ustanovki." *Innovation Science* 10 (2020): 25–27.
19. Gerasidi, V. V. "Expansion of the existing fundamentals of vibration diagnostics of marine main propulsion systems." *Marine Intelligent Technologies* 2–1(68) (2025): 162–171. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.019.
20. Alekseeva, T. V., S. V. Kolosov et al. *Tekhnicheskaya diagnostika gidravlicheskikh privodov*. M.: Mashinostroenie, 1989: 264.
21. Tokarev, V. P. and D. D. Kudashov. "Before compressor stall condition of gte condition diagnostic system." *Vestnik Ugatu* 18.1(62) (2014): 73–78.
22. Isintaev, T. I., B. K. Kaliev, A. M. Plaksin et al. "Surge study by improving the design of testing facility for agricultural turbochargers." *APK Rossii* 27.4 (2020): 642–648.
23. Burtsev, A. Yu., A. V. Gritsenko, A. M. Plaksin and I. Ganiev. "The investigation of the surge phenomenon and the lubrication process in the rotor of turbocharger with its artificial braking." *APK Rossii* 23.4 (2016): 820–827.

24. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and N. N. Stenin. "Kavitatsiya v gidravlicheskom privode peregruzochnykh mashin." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova": Sbornik nauchnykh statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 20 sentyabrya — 22 2021 goda. Tom 1.* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2022: 148–154.

25. Stupin, O. A., S. I. Nekrasov and R. G. Kuchinskiy. "Vibrodiagnostics as a modern method of monitoring and diagnostics of hydraulic drives of technological machines." *International Technical and Economic Journal* 5–6 (2022): 75–86. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-76-87.

26. Gerike, P. B. "Adaptive predictive modeling of the degradation of the technical condition of rotating equipment mining shovels, based on the analysis of vibration parameters." *Bulletin of The Kuzbass State Technical University* 6(112) (2015): 71–78.

27. Lyutin, K. I. and V. E. Fedyanov. "Vibrodiagnostika sistem DVS s ispol'zovaniem neyronnykh setey." *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnye transportnye sistemy* 2.8(34) (2007): 88–90.

28. Turyanskiy, A. M. and A. I. Soldatov. "Methods of acoustic data processing for identifying noise sources in motor vehicles using neural networks." *Science Prospects* 5(188) (2025): 34–37.

29. Chupakhin, A. V. and V. S. Chupakhin. "Diagnosing technical conditions of the equipment on the basis of measurments of indirect structural parameters in the process of pre-corrective maintenance." *Vestnik of Voronezh State Agrarian University* 1(36) (2013): 125–127.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зуб Игорь Васильевич —

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

Ежов Юрий Евгеньевич —

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

Тындыкарь Любовь Николаевна —

старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: tyndykarln@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub, Igor V. —

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

Ezhov, Yurii E. —

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

Tyndykar, Lyubov N. —

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

Статья поступила в редакцию 12 января 2025 г.

Received: Jan. 12, 2025.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА СПЛАЙНАМИ ЛАГРАНЖЕВА ТИПА

И. В. Ююкин

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

Темой работы является исследование проблем моделирования траекторий на основе сплайнов лагранжевого типа с синхронным представлением вахтенному помощнику геометрического компьютерного сопровождения генезиса программируемого плавания в режиме реального времени. Поскольку тактически сплайновая кривая строится и управляется контрольными точками, то выдвигается гипотеза, что положение точечных маркеров может задаваться пользователем в интерактивном режиме в соответствии с требованиями конкретики навигационной задачи с целью практической реализации возможности динамичной модификации маршрута в случае стратегической недоступности изначально выбранного пути. Задача маршрутизации рассматривается как многокритериальный поиск наилучшей траектории движения судна в обход ограничительных препятствий с алгоритмической возможностью своевременного уклонения от запретных районов плавания. В аспекте нового подхода маршрутизации инициируется реконструкция плавной траектории движущегося объекта как реализации концепции программного следования по прогнозируемой линии пути в зоне навигационной безопасности. Предполагается, что в математическом обеспечении алгоритмов адаптивных морских систем сплайновая интерполяция Лагранжа может обеспечить максимальное приближение к реальной гладкой траектории движения мобильного объекта в конфликтной среде. В ситуации применения сплайн-функций добавляется фактор внутренней геометрии синтезированной траектории в виде феномена «гладкости». В контексте поставленной задачи «гладкость» траектории понимается как фактический синоним плавности моделируемой изолинии. Акцентируется необходимость моделирования траектории кубическими сплайн-функциями Лагранжа, имеющими непрерывную производную до второго порядка, так как движение любого реального объекта традиционно характеризуется как мгновенной скоростью движения по траектории, так и непрерывным ускорением. В качестве демонстрации практической применимости построения оптимальной конфигурации лагранжевой сплайн-траектории апробирована конкретная вариативность плавного маршрута в проектировании компьютерного скриншота как результат работы разработанного программного обеспечения. Аргументированы такие преимущества сплайнов Лагранжа, как относительная простота построения, максимальная «гладкость», удовлетворительные интерполяционные свойства, единственность решения и устойчивость алгоритма точечной интерполяции, а также доступная точность восстановления априорно заданных навигационных функций.

Ключевые слова: сплайн лагранжевого типа, генезис программируемого плавания, запретный район плавания, зона навигационной безопасности, «гладкость» траектории, лагранжева сплайн-траектория, точечная интерполяция.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Моделирование траектории движения судна сплайнами Лагранжева типа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 232–249. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-232-249. — EDN EFICBR.

MODELING OF A SHIP TRAJECTORY USING LAGRANGE-TYPE SPLINES

I. V. Yuyukin

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

The paper addresses the problems of trajectory modeling based on Lagrange-type splines with simultaneous real-time visualization of geometric computer support for the genesis of programmable navigation for the officer

of the watch. Since a spline curve is constructed and controlled by control points, it is hypothesized that the positions of point markers can be interactively specified by the user in accordance with the requirements of a particular navigation task in order to enable dynamic route modification in the event of the unavailability of the initially selected path. The routing problem is considered as a multi-criteria search for an optimal vessel trajectory that avoids restrictive obstacles, with algorithmic capability for timely avoidance of no-go areas. Within the proposed routing approach, the reconstruction of a smooth trajectory of a moving object is implemented as part of the concept of programmatic following of a predicted path within a navigation safety zone. It is assumed that, within the mathematical framework of adaptive marine system algorithms, Lagrange spline interpolation can provide a close approximation to the real smooth trajectory of a mobile object in a constrained environment. When spline functions are applied, an additional factor arises related to the internal geometry of the synthesized trajectory, expressed as the property of "smoothness." In this context, trajectory smoothness is interpreted as an equivalent of the continuity of the modeled isoline. The necessity of modeling the trajectory using cubic Lagrange spline functions with continuous derivatives up to the second order is emphasized, since the motion of any real object is characterized by both instantaneous velocity along the trajectory and continuous acceleration. As a demonstration of practical applicability, a specific variant of a smooth route is implemented in the form of a computer-generated screenshot obtained using the developed software. The advantages of Lagrange splines are substantiated, including relative simplicity of construction, high smoothness, satisfactory interpolation properties, uniqueness of the solution, stability of the point interpolation algorithm, and sufficient accuracy in reconstructing a priori specified navigation functions.

Keywords: Lagrange-type spline, programmable navigation, no-go area, navigation safety zone, trajectory smoothness, Lagrange spline trajectory, point interpolation.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Modeling of a ship trajectory using Lagrange-type splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 232–249. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-232-249.

Введение (Introduction)

Безопасность судовождения корреляционным образом зависит от умения судоводителей выбирать эффективную организацию планирования траектории и маршрутного маневрирования судна на основе актуальной алгоритмизации. Задача маршрутизации выполняется как многокритериальный поиск наилучшей траектории при широком спектре современных возможностей контроля движения мобильного объекта относительно фактических препятствий [1]. Оптимальность маршрута обеспечивает физическую реализуемость высокой точности удержания судна на заданном курсе, что является важнейшим фактором совершенствования методов управления судном [2].

Выполнение ограничений по динамике транспортных единиц и реализуемость синтеза управления движением основаны на апробировании так называемых *гладких траекторий*. Надежная математическая формализация программных траекторий позволяет судоводителю в условиях стесненности морской акватории эффективно решать проблемы интеллектуального планирования предварительного пути на новом качественном уровне [3]. Под интеллектуальным планированием понимается задача многофакторного анализа безопасности перехода управляемого судна из исходного состояния в целевое конечное положение при безопасной реализации предварительного плана маршрутизации посредством контрольного фиксирования текущих координат.

Ключевая задача навигации по планированию и автоматическому построению программного движения судна требует применения новых математических подходов [4]. В аспекте реализаций инновационного подхода планирования движения судна иницируется моделирование «гладкости» сплайнового маршрута при синтезировании плавной траектории как стратегически безопасное следование в заданном направлении с учетом воздействия различных навигационных ограничений. В математическом обеспечении алгоритмов адаптивных динамических систем транспортных средств сплайновая интерполяция кусочной алгебраической кривой обеспечивает лучшее приближение к реальной гладкой траектории движения подвижного объекта [5].

В контексте эффективного планирования траектории представляется целесообразным организовать генерирование безопасного перехода на основе алгоритма кубических сплайнов Лагранжа, позволяющего избежать избыточной сложности кусочных интерполяций и одновременно

сконфигурировать эффективный маршрут в качестве реализации тактики движения судна в конфликтной среде. Сплайновый перспективный метод планирования идеально согласуется с классической проработкой перехода судна и традиционностью мотивации его уклонения от запретных районов плавания.

В морской практике прослеживается аналогия данного подхода в реализованной необходимости безопасного следования судна из порта отхода в порт прихода в рамках актуальной концепции штурманской проработки перехода морем на основе традиционного тщательного электронного подъема карты. С позиций моделирования программируемой сплайн-траектории в результате итерационного поиска лучшего варианта *точечного интерполирования*¹ формируется оптимальный геометрический путь от начальной до конечной точки, проходящий через заранее определенные путевые точки маршрута следования судна.

Сценарная интерполяция траектории, проводимая через заданные точки, становится в математическом смысле характерным постулатом для практического судовождения, так как в классическом варианте при плавании судна всегда используется некоторая последовательность маршрутных точек, плановое прохождение которых контролируется мгновенными наблюдениями. Задачи движения по программной траектории, предполагающие оптимизационный обход опасностей, характеризуются множеством возможных траекторий. При этом необходим не столько поиск строгих математических решений, сколько подбор итераций, подходящих для конкретного практического случая [6].

В условиях непредсказуемой навигационной обстановки итеративный метод планирования минимизирует отклонения от предварительного маршрута перехода, поскольку обязательность исполнительной линии пути инициирует оперативную коррекцию маршрута в зависимости от необходимости маневрирования судна на основе оценивания множества достижимости навигационных параметров безопасности на акцентируемой области водного пространства [7]. Практическое применение предлагаемого сплайнового подхода в качестве экспертной поддержки ситуационного мышления может позволить судоводителю однозначно трактовать навигационную обстановку в условиях необходимости перепрограммирования движения при самых сложных обстоятельствах плавания.

Целью исследования является реализация возможности принятия согласованного решения персоналом по управлению судном за счет оперативной оценки вариантов маршрутизации на последующих итерациях, которые служат для поиска безопасных сплайн-траекторий, проходящих через целевую путевую точку, с синхронным представлением вахтенному помощнику компьютерной графической информации в режиме реального времени.

С целью апробирования предлагаемого математического подхода к моделированию траектории движения судна сплайнами лагранжева типа сформулированы следующие задачи:

1. Алгоритмическое обеспечение построения гибкой конфигурации сплайновой траектории с целью реализации математической плавности как основного критерия оптимизации за счет реализации возможности эффективного оперирования формой интерполятора.
2. Апробирование алгоритма моделирования навигационной траектории сплайнами лагранжева типа для итерационной маршрутизации с адаптацией метода интерполяции для синтеза вариативной гибкости модификации безопасной траектории.
3. Детальное рассмотрение преимуществ сплайнов Лагранжа в контексте моделирования импровизированной траектории в сравнении с использованием базисных финитных сплайнов.
4. Программная реализация для бортового компьютера сплайн-алгоритма при интерактивной маршрутизации с геометрической интерпретацией на основе средств компьютерной визуализации в режиме реального времени.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При реконструкции навигационной траектории практический интерес представляет разработка алгоритмов восстановления дискретных данных в форме плоской алгебраической кривой

¹ Гончаров В. В. Теория интерполирования и приближения функций. М.-Л.: ОНТИ-ГТТИ, 1934. 316 с.

с одновременным наследованием изогеометрических свойств для практического достижения «математического изящества» трековой линии. Интерполяция траектории движения судна фактическим образом реализуется за счет умножения множителей Лагранжа на расчетные скалярные коэффициенты c_i в каждом промежуточном узле x_i сеточного интервала.

При кусочном многообразии кубических сплайновых функций $L_i(x_i)$ лагранжевого типа предлагается к апробации следующая адаптированная под поставленную задачу алгоритмическая комбинация в компактной форме записи:

$$S(x) = \sum_{i=1}^N c_i L_i(x_i), \quad (1)$$

где c_i — скалярные коэффициенты, подлежащие предварительному вычислению; x_i — дискретные узлы на целочисленной сетке x в равномерных разбиениях от 1 до N ; $L_i(x_i)$ — кусочно-кубические фундаментальные многочлены Лагранжа².

Модифицированные множители Лагранжа $L_i(x_i)$ являются своеобразными факторами вариативности вычислительной эффективности сплайн-интерполяции. Представление кусочной модификации в виде (1), по сути, является *интерполяционной формулой Лагранжа* для гладких аналогов сплайнов³. Так называемый *многочлен лагранжевой формы* был впервые предложен французским математиком Жозефом Луи Лагранжем как способ построения *интерполяционного полинома* без предварительного вычисления коэффициентов. Практическое использование классической формулы Лагранжа началось с момента его первой публикации о математическом феномене в 1795 г.

Синтезируемая траектория должна проходить через заданные реперные позиции, так как формирование кривой по известному расположению ряда точек представляет традиционное решение задачи интерполяции. Например, с помощью полиномиальной интерполяции можно обеспечить прохождение кривой строго через известные точечные координаты. Для этого необходимо точное определение коэффициентов полинома определенной степени. В вариативном контексте реалистичность формы кривой линии, зафиксированной между заданными точками, зависит от порядка полинома и выбранных граничных условий. Интерполирующая изолиния естественным образом формализует оценочные значения числовых данных на рассматриваемом диапазоне функциональной аргументации.

Практическая задача построения по табличным данным реалистичной кривой сложной формы с сохранением выделенных геометрических характеристик исходных измерительных данных понимается как формальная проблема *точечной интерполяции*. При практических вычислениях целесообразно использовать не единственный монотонный полином Лагранжа по многим точкам интерполяции, а кусочные модифицированные лагранжевы функции $L_i(x_i)$, образованные посредством умножения на постоянные скалярные коэффициенты при математическом сегментном манипулировании [8].

Данный прием позволяет избежать негативный факт произвольного масштабирования некорректными соотношениями сплайнов, вырождающийся на практике в так называемый *эффект Рунге*. Кроме того, сплайн лагранжева типа абсолютно нивелирует решающее отрицательное свойство глобальной полиномиальной интерполяции в виде обязательности пересчета всех множителей единого стратегического многочлена Лагранжа при простой необходимости добавления одного нового узла интерполяции. Добавление новых узлов интерполяции подразумевает только локальную модификацию интерполирующего сплайна лагранжевого типа [9].

Свойство локальности потенциально обеспечивает необходимость исключительного пересчета минимального фрагмента траектории при изменении, добавлении или удалении узловых точки в массиве сеточных данных, что обеспечивает преимущество сплайна лагранжева типа по сравнению с множеством других математических способов [10]. В ситуации применения альтернативных традиционных алгоритмов при добавлении новой контрольной точки или изменении

² Квасов Б. И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами. М.: Физматлит, 2006. 360 с.

³ Завьялов Ю. С. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.

существующей позиции вся математическая конструкция полностью пересчитывается при затратном вычислительном ресурсе.

В случае применения кубических интерполянтов отличие сплайна лагранжевого типа от B -сплайна заключается в некритичной утрате свойства нормализованности базисных финитных функций, образующих числовое разложение единицы на каждом отдельном узловом полигоне [11]. Формат отдельной конструкции кубического сплайна лагранжева типа в одномерном случае показан на рис. 1.

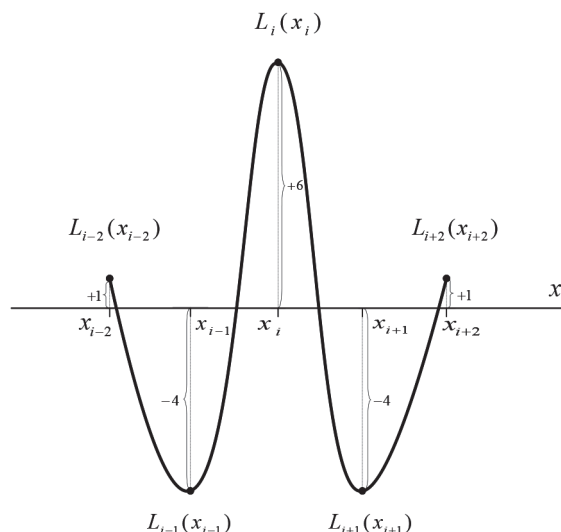


Рис. 1. Отдельный кубический сплайн лагранжева типа на пятикратном узловом полигоне
Fig. 1. Individual cubic Lagrange-type spline on a five-node polygon

Сплайны Лагранжа синхронно соотносятся с базисными сплайнами в узловых точках сетки по принципу организации построения, но различаются по внешней форме в сплайновых контурах видом «шаговых функций» [12]. Как показано на рис. 2, каждый сплайн Лагранжа геометрически синтезирует трехкратное сочетание импульсных образов в положительной и отрицательных областях определения кусочной функциональной зависимости.

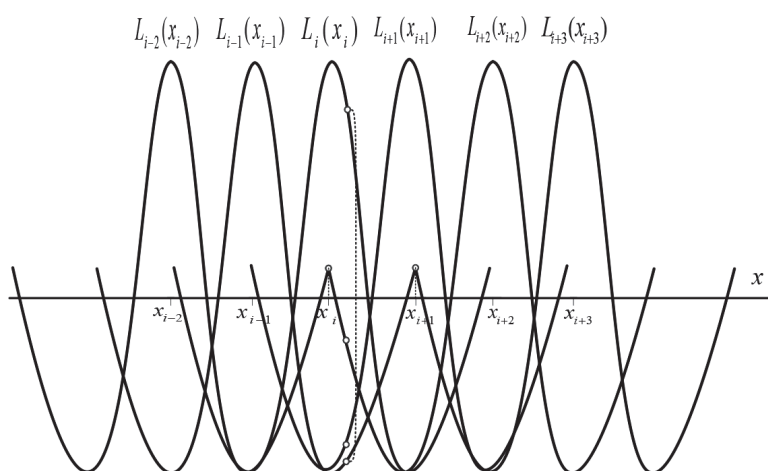


Рис. 2. Демонстрация вычисления произвольного значения сплайн-лагранжевой траектории
Fig. 2. Demonstration of computation of an arbitrary value of a Lagrange spline trajectory

В общем случае генерирование навигационной функции в произвольной точке $x^* \in [x_i, x_{i+1}]$ потока числовой информации, включая границы обозначенного сеточного интервала (см. рис. 2), осуществляется на основе шестизлементной композиции сплайна лагранжевого типа:

$$S(x^*) = c_{i-2}L_{i-2}(x^*) + c_{i-1}L_{i-1}(x^*) + c_iL_i(x^*) + c_{i+1}L_{i+1}(x^*) + c_{i+2}L_{i+2}(x^*) + c_{i+3}L_{i+3}(x^*). \quad (2)$$

Из анализа рис. 2 следует, что для любого промежуточного аргумента x^* внутри одного выбранного случайным образом сеточного сегмента $[x_i, x_{i+1}]$ необходимо задействовать значения четырех функций Лагранжа: $L_{i-1}(x_{i-1})$, $L_i(x_i)$, $L_{i+1}(x_{i+1})$, $L_{i+2}(x_{i+2})$. Пятый множитель $L_{i-2}(x_{i-2})$ или $L_{i+3}(x_{i+3})$ участвует в расчете только в том случае, когда необходимо выполнить конкретное вычисление в любом из двух узлов x_i или x_{i+1} .

В формуле (2) фигурируют шесть компонент сплайнов лагранжева типа исключительно для теоретического обозначения в общем случае максимально возможных вариантов решения без необходимого вычета одного элемента за счет выбора вариантности в случае строгого попадания на любую границу отдельного сеточного отрезка. Фактически при вычислении на левой или правой границе единичного носителя $[x_i, x_{i+1}]$ четыре активных элемента гладких аналогов лагранжевых сплайнов: $L_{i-1}(x_{i-1})$, $L_i(x_i)$, $L_{i+1}(x_{i+1})$, $L_{i+2}(x_{i+2})$, дополняются пятым $L_{i-2}(x_{i-2})$ или $L_{i+3}(x_{i+3})$ с выбором из двух возможных вариантов, а шестой множитель: $L_{i+3}(x_{i+3})$ или $L_{i-2}(x_{i-2})$ автоматически принимает нулевое значение в зависимости от того, по левой или правой границе сеточного интервала выполняется вычисление.

Набор из сплайновых множителей Лагранжа, в удобной форме способствующих восстановлению максимально гладкой траектории устойчивым образом, организует лучшую математическую альтернативу B -сплайновому сочетанию при локальной сходимости лагранжевого интерполяционного процесса в вычислительном аспекте *условной оптимизации*. Рис. 3 интерпретирует геометрическое моделирование гипотетической навигационной траектории в условном обозначении $U = f(x, y)$ для локальной системы координат серией модифицированных функций Лагранжа из шести вариаций основной конструкции сплайнового многозвенника.

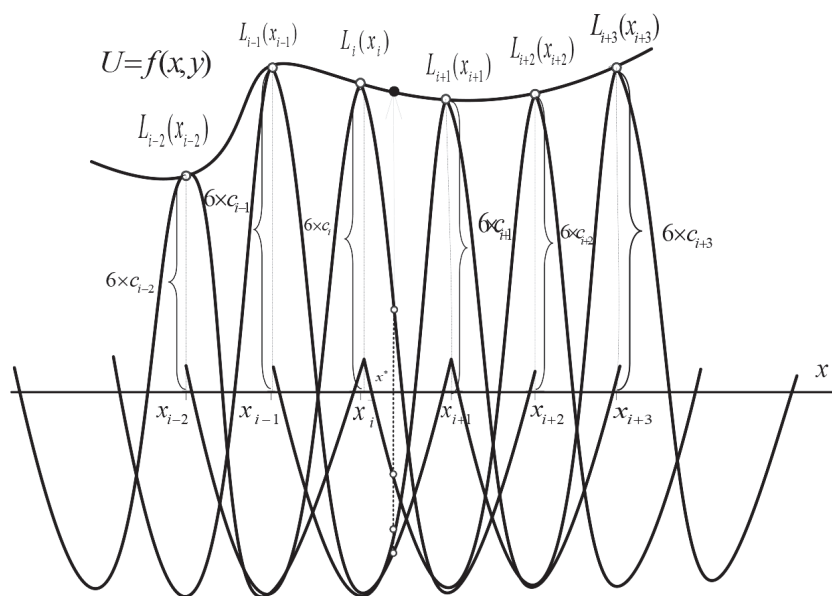


Рис. 3. Геометрическая интерпретация интерполяции абстрактной траектории сплайнами лагранжева типа
Fig. 3. Geometric interpretation of interpolation of an abstract trajectory using Lagrange-type splines

Скалярные сплайновые коэффициенты c_i , фактически выполняющие в алгоритме опцию калибровочных соотношений, необходимы для умножения в каждом сеточном узле на лагранжевы компоненты $L_i(x_i)$ с целью реализации непосредственно процедуры сплайн-интерполяции как таковой [13]. Рис. 3 поясняет технологию процесса интерполяции за счет масштабирования множителей Лагранжа по аналогии с формализацией навигационных изолиний B -сплайном [11].

Наглядно демонстрируется, что лагранжев сплайн и синтезируемая навигационная функция представляют собой разные геометрические объекты. Ассоциированный сплайн лагранжевого типа формирует по дискретным данным искусственную кусочную конструкцию, но аналогично координатному B -сплайну не является непосредственно фактическим фрагментом интерполируемой кривой. Сплайн Лагранжа представляет собой вторичную абстракцию по отношению к фрагменту оригинальной траектории и фактически служит ее максимально близким замещением [14]. В экстремальном варианте применения искаженного сплайна не создается препятствия последовательному соединению фрагментарных носителей без резких функциональных изменений и разрывов, что формирует реалистичную «склеенную» геометрическую форму в целом при любых неблагоприятных геометрических обстоятельствах.

Непрерывность навигационной функции в узловой точке математически означает признанное равенство пределов справа и слева. При заданной функции обобщением этой ситуации является равенство значений двух функционалов с фиксациями, расположенными по разные стороны от указанной точки. Интерполяция искаженной траектории обычными сплайнами затруднена. Желательно иметь сплайны со свойствами, аналогичными свойствам интерполируемой функции. Такие свойства могут быть сформулированы с помощью искусственных функционалов.

В ситуации непрерывности значение функции можно рассматривать как равенство значений двух функционалов применительно к этой функции: один функционал является левым пределом математической функции в этой точке, второй — ее правым пределом [15]. Под непрерывностью функции подразумевается фиктивное совпадение значений двух функционалов в точке разрыва функции, где упомянутые функционалы имеют свои формализации в смежных сегментах. Таким образом, искусственно вводимое абстрактное условие позволяет практически оперировать понятием *гладкости* при реализации рассмотрения всех возможных тенденций сингулярного поведения навигационных функций в окрестности выбранной отдельной проблемной точки.

При рассмотрении гипотетического вопроса целесообразности манипулирования формой восстанавливаемого кубическим сплайном математического объекта динамической системы усматривается вероятность допустимого изгиба «гладкой» траектории с однократным разрывом производной навигационной функции. В парадигме изогеометрического анализа данный геометрический эффект указывает на тактическую возможность синтеза искаженных изолиний [16].

Фактически с позиций теории интерполяции любой кубический сплайн имеет два значения в каждой позиции разрыва, а именно: функциональное значение слева, определяемое левым сплайновым многочленом, и значение функции справа — правым многочленом. С целью использования математического искажения предлагается выбирать в каждой точке разрыва значение справа, т. е. условно считать, что сплайн является типичной *экстраполированной функцией*, что формирует однозначность программной реализации кусочной алгоритмизации. Для формального преобразования точки разрыва левый и правый многочлен виртуально «склеиваются» в один условный правый с организацией унимодальной функции, уменьшающей вариацию. Таким образом, фактическая точка разрыва обладает свойством строгого альтернирования в смысле совпадения по значению с правым многочленом при абстрагировании от фактического существования функциональной неопределенности ввиду конкретизации признания условия «отсутствия узла».

Реальная математическая кривая синтезируется методом умножения последовательности множителей Лагранжа на скалярные коэффициенты $c_{i-2}, c_{i-1}, c_i, c_{i+1}, c_{i+2}, c_{i+3}$ как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала (см. рис. 2). В некотором узле x_i сплайн лагранжева типа формируется на основе пяти активных элементов $L_i(x_i)$ с номерами $i-2, i-1, i, i+1, i+2$ в отличие от базисного сплайна, организованного из трех ненулевых коэффициентов [11]. Следовательно, условия интерполяции сплайном Лагранжа навигационной траектории для левой границы симплекса $[x_i, x_{i+1}]$ приобретают следующий вид:

$$c_{i-2}L_{i-2}(x_i) + c_{i-1}L_{i-1}(x_i) + c_iL_i(x_i) + c_{i+1}L_{i+1}(x_i) + c_{i+2}L_{i+2}(x_i) = f_i, \quad i = 2, \dots, N-1. \quad (3)$$

Фактически алгебраическая система уравнений (3), составленная из $N - 2$ уравнений, имеет N неизвестных сплайновых множителей c_i с учетом двух дополнительных коэффициентов: c_0 и c_{N+1} . Для формирования системы (3) следует добавить два краевых условия по первой производной, задающих математический аналог физической напряженности траекторной сплайновой кривой:

$$\left. \begin{aligned} c_0 L'_0(x_2) + c_1 L'_1(x_2) + c_2 L'_2(x_2) + c_3 L'_3(x_2) + c_4 L'_4(x_2) &= f'_2; \\ c_{i-2} L'_{i-2}(x_i) + c_{i-1} L'_{i-1}(x_i) + c_i L'_i(x_i) + c_{i+1} L'_{i+1}(x_i) + c_{i+2} L'_{i+2}(x_i) &= f'_i; i = 2, \dots, N-1; \\ c_{N-3} L'_{N-3}(x_{N-1}) + c_{N-2} L'_{N-2}(x_{N-1}) + c_{N-1} L'_{N-1}(x_{N-1}) + c_N L'_N(x_{N-1}) + c_{N+1} L'_{N+1}(x_{N-1}) &= f'_{N-1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Используя краевые условия для исключения двух коэффициентов c_0 и c_{N+1} из системы уравнений (4), получим:

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{f'_2 - c_1 L'_1(x_2) - c_2 L'_2(x_2) - c_3 L'_3(x_2) - c_4 L'_4(x_2)}{L'_0(x_2)}; \\ c_{N+1} &= \frac{f'_{N-1} - c_{N-3} L'_{N-3}(x_{N-1}) - c_{N-2} L'_{N-2}(x_{N-1}) - c_{N-1} L'_{N-1}(x_{N-1}) - c_N L'_N(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда первое и последнее уравнения краевых условий интерполяции (4) приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} c_0 L_0(x_2) + c_1 L_1(x_2) + c_2 L_2(x_2) + c_3 L_3(x_2) + c_4 L_4(x_2) &= f_2; \\ c_{N-3} L_{N-3}(x_{N-1}) + c_{N-2} L_{N-2}(x_{N-1}) + c_{N-1} L_{N-1}(x_{N-1}) + c_N L_N(x_{N-1}) + c_{N+1} L_{N+1}(x_{N-1}) &= f_{N-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив в уравнения (6) вместо коэффициентов c_0 и c_{N+1} их выражения с использованием краевых условий (5), получим:

$$\begin{aligned} &\frac{(f'_2 - c_1 L'_1(x_2) - c_2 L'_2(x_2) - c_3 L'_3(x_2) - c_4 L'_4(x_2)) L_0(x_2)}{L'_0(x_2)} + c_1 L_1(x_2) + c_2 L_2(x_2) + \\ &\quad + c_3 L_3(x_2) + c_4 L_4(x_2) = f_2; \\ &c_{N-3} L_{N-3}(x_{N-1}) + c_{N-2} L_{N-2}(x_{N-1}) + c_{N-1} L_{N-1}(x_{N-1}) + c_N L_N(x_{N-1}) + \\ &+ \frac{(f'_{N-1} - c_{N-3} L'_{N-3}(x_{N-1}) - c_{N-2} L'_{N-2}(x_{N-1}) - c_{N-1} L'_{N-1}(x_{N-1}) - c_N L'_N(x_{N-1})) L_{N+1}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} = f_{N-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом уравнений (7) в модифицированном виде алгебраическая система уравнений (4), состоящая из упорядоченных между собой наборов кусочных многочленов Лагранжа, примет вид:

$$\left. \begin{aligned} &c_1 \left[L_1(x_2) - \frac{L'_1(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] + c_2 \left[L_2(x_2) - \frac{L'_2(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] + c_3 \left[L_3(x_2) - \frac{L'_3(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] + \\ &+ c_4 \left[L_4(x_2) - \frac{L'_4(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] = f_2 - \frac{f'_2}{L'_0(x_2)} L_0(x_2); \\ &c_{i-2} L_{i-2}(x_i) + c_{i-1} L_{i-1}(x_i) + c_i L_i(x_i) + c_{i+1} L_{i+1}(x_i) + c_{i+2} L_{i+2}(x_i) = f_i, \quad i = 3, \dots, N-2; \\ &c_{N-3} \left[L_{N-3}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-3}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] + c_{N-2} \left[L_{N-2}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-2}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] + \\ &+ c_{N-1} \left[L_{N-1}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-1}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] + c_N \left[L_N(x_{N-1}) - \frac{L'_N(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] = \\ &= f_{N-1} - \frac{f'_{N-1}}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Матричная форма построения сплайна лагранжева типа формируется на основе организации интерполяционной матрицы пятидиагональной структуры, что гарантирует вычислительную устойчивость к погрешностям числовых округлений:

$$\begin{bmatrix} K_1 & M_1 & P_1 & S_1 & 0 & R_1 \\ R_2 & K_2 & M_2 & P_2 & S_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & R_{N-1} & K_{N-1} & M_{N-1} & P_{N-1} & S_{N-1} \\ S_N & 0 & R_N & K_N & M_N & P_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f_N \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $R_1 = 0$;

$$K_1 = L_1(x_2) - \frac{L'_1(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$M_1 = L_2(x_2) - \frac{L'_2(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$P_1 = L_3(x_2) - \frac{L'_3(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$S_1 = L_4(x_2) - \frac{L'_4(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$R_i = L_{i-2}(x_i);$$

$$K_i = L_{i-1}(x_i);$$

$$M_i = L_i(x_i);$$

$$P_i = L_{i+1}(x_i);$$

$$S_i = L_{i+2}(x_i);$$

$$R_N = L_{N-3}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-3}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$K_N = L_{N-2}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-2}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$M_N = L_{N-1}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-1}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$P_N = L_N(x_{N-1}) - \frac{L'_N(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$S_N = 0;$$

$$f_1 = f_2 - \frac{f'_2}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$f_N = f_{N-1} - \frac{f'_{N-1}}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}).$$

Вычисление линейных функционалов из (1) предполагает решение системы линейных алгебраических уравнений в матричном исчислении (9). Интерполяционная матрица в (9) представляет собой пятидиагональную структуру, что служит гарантией того, что применяемый алгоритм является устойчивым. Матрицы с диагональным преобладанием всегда не вырождены, а, следовательно, математическая формализация (9) имеет стабильное решение. Впрочем, сплайновым расчетом можно пользоваться также при отсутствии диагонального преобладания, при этом без полной уверенности в конечном успехе математических действий. Кроме того, диагональное преобладание теоретически обосновывает существование и единственность интерполянта с позиций теории сплайн-функций.

Метод исключения Гаусса реализуется по более простым формулам метода прогонки с учетом феномена пятидиагональности. *Алгоритм прогонки* корректен для матрицы с пятидиагональным преобладанием из системы уравнений (9) в том смысле, что все математические действия, связанные с их осуществлением, практически выполнимы, т. е. знаменатели в формулах нигде не обращаются в ноль. Необходимо отметить еще одно важное обстоятельство: *алгоритм прогонки асимптотически устойчив, вследствие чего не происходит прогрессивного роста погрешности вычислений*.

Гипотетическое отсутствие фактора устойчивости алгоритма является явным признаком возможности прогрессивного роста вычислительных погрешностей. Поскольку системы уравнений для сплайнов высоких степеней неоправданно усложняются, диагональное преобладание в соответствующих системах уравнений отсутствует, что не позволяет гарантировать сходимость вычислительного процесса и затрудняет получение оценок погрешности определяемых параметров, предпочтение отдается сплайну третьей степени. Дополнительная уникальность кубического сплайна заключается в возможности интерполяции данных без каких-либо ограничений на расстояние между узлами [17].

Задача интерполяции на лагранжевых элементах действительно имеет единственное точное решение [18]. Относительная методическая погрешность вычислений с помощью лагранжевого полинома на примере числовых реализаций функции синуса составляет ориентировочно 3 % потери точности, что подтверждает высокое качество интерполяции⁴. Погрешности в позиции одного отдельного узла стратегически не влияют на общую форму интерполяционной контурной линии благодаря *феномену локальности* как условию контроля формы полученной кривой к исходным узловым значениям при генерировании траекторий различных видов. Согласно многочисленным экспериментальным данным, подход с позиций множителей Лагранжа при программной реализации пересчета аналогий формул (1)–(9) обеспечивает в вычислительном аспекте экономию компьютерного времени на 30–80 % по сравнению с альтернативным *методом штрафных функций*⁵.

С позиций предлагаемого подхода мажорируются две концепции комбинированного алгоритма: метод, ориентирующийся на лагранжевы аналоги сплайнов в окрестности оптимума решения задачи, и активизация *B*-сплайнов, обеспечивающих итерационный поиск устойчивого результата на всем диапазоне решений. Допустимое комплексирование двух различных сплайновых методов позволяет реализовать математический компромисс при одновременном использовании преимуществ как одного, так и другого методического варианта для успешного решения прикладных задач современной навигации без преобразования одного представления сплайна в другое. Переключение на определенный метод осуществляется без применения специальных штрафных критериев, но схема реализуется автоматически за счет смещения вычислительного акцента в интерполяционной матрице простым численным превосходством множителей Лагранжа или базиса «шапочных функций» с унифицированной целью автоматической адаптации удобного сплайна к исходным дискретным данным⁶.

В зависимости от того, какой метод масштабирует точнее интерполируемую навигационную функцию, выбирается тот, который обеспечивает гладкое моделирование навигационной траектории. В тех случаях, когда по условию постановки задачи известна априорная информация, позволяющая успешно выбрать начальное приближение, становится достижимым заблаговременно определить, какой из двух методов можно использовать оптимальным образом при вариативности сплайнов лагранжевого типа или *B*-сплайнового интерполятора [19]. Напротив, при недостаточной адекватности исходной информации ресурс гармоничного сочетания *B*-сплайнов и сплайнов лагранжевого типа определяет успешность решения сложной задачи судовождения.

⁴ Иванов А. П., Олемский И. В. Численные методы. СПб.: СПбГУ, 2012. 80 с.

⁵ Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.

⁶ Kvasov B. I. Methods of Shape-Preserving Spline Approximation. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. 338 p.

Применение методов глубокого обучения нейросетевого программирования для методологии планирования дает возможность существенно улучшить любой математический алгоритм с целью организации оптимального пути в качестве будущей инициативы [20]. В контексте планирования пути глубокое обучение позволяет нейронной сети при реализации специфического компьютерного программного обеспечения адаптивным образом генерировать маршрутизацию с реалистичным учетом зоны навигационной безопасности на основе обработки большого объема навигационной информации.

Результаты (Results)

Практическое применение сплайнов лагранжевого типа обусловлено положительной реализацией определенности вычислительных операций. При использовании полиномов Лагранжа появляется явное преимущество алгоритмизации в виде повышения вычислительной устойчивости метода за счет того, что для коэффициентов полинома Лагранжа не требуется обращение невырожденной интерполяционной матрицы коэффициентов (9) при ее фактическом представлении в стандартной размерности. Вследствие данного факта проблема сходимости интерполяционного процесса, как правило, исчезает при переходе к интерполяции лагранжевыми сплайнами.

На скриншоте, представленном на рис. 4 в условной локальной системе координат, имитируется моделирование сложной абстрактной линии сплайн-пути судна, синтезированной на основе кубических сплайнов лагранжевого типа при практическом использовании формул (1)–(9).

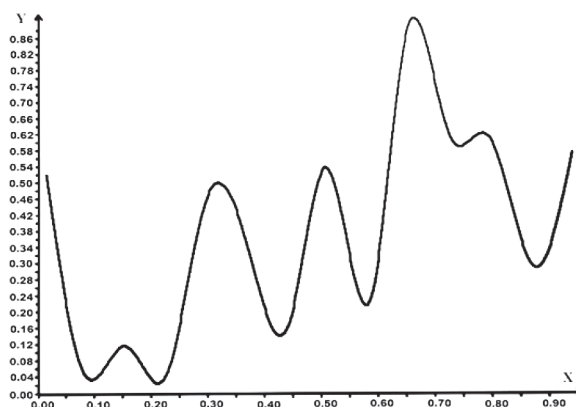


Рис. 4. Импровизация геометрической интерпретации синтеза траектории кубическим сплайном лагранжевого типа

Fig. 4. Geometric interpretation of trajectory synthesis using a cubic Lagrange-type spline

Демонстрируемый на рис. 4 скриншот является одним из вариантов многочисленных приложений синтеза плавных траекторий судна, моделируемых на основе сплайнов лагранжевого типа. Оперативное время построения лагранжевой сплайн-траектории практически сопоставимо с ее синтезом посредством применения *B*-сплайнов. В обоих случаях использовались кубические кусочные конструкции. При реализации вычислительного эксперимента время работы подпрограммы замерялось в тысячных долях секунды с заикливанием на 100000 при синтезировании одинаковых траекторий, одна из которых вариативно показана на рис. 4. Результаты быстрого действия в цифровой реализации выводились на дисплей компьютера в паскалевской оперативной среде.

С целью обеспечения наглядности восприятия визуализированных траекторий может применяться стратегия подгонки любой формы алгебраической кривой с помощью варьирования сплайновыми функциями на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала для быстрого получения дополнительного узла по *схеме Марседана*. При оптимальной организации сеточных узлов использование напряженного сплайна позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию реконструированной алгебраической линии с допустимой кривизной.

Для эффективного решения задачи параметризации автором данного исследования разработана процедура последовательной оптимизации программируемого размещения узлов с ее синхронной реализацией в виде дополнительной подпрограммы прикладного программного обеспечения. Предлагаемый *принцип скользящего узла* создает альтернативу равномерной сетке координат при экспериментально доказанном двукратном увеличении скорости вычислений [21]. Подбор узлов осуществляется автоматически с учетом обеспечения наперед заданной минимальной погрешности интерполяции.

Сплайновые конструкции обеспечивают точную подгонку сплайновой кривой к набору запланированных доминирующих узлов, поскольку правильно выбранные маркерные точки играют важную роль в получении лучшего моделирования алгебраической кривой любой степени сложности. Суть разработанной в исследовании стратегии оптимизации сводится к поиску эффективных хаотических узлов на неравномерной сетке, вследствие чего разработанный *принцип скользящего узла* является хорошим эвристическим приемом. Дополнительно существует подход к уточнению приближенного решения, полученного с помощью метода вариационной сетки. Данный метод может быть применен для адаптивного уточнения ранее рассчитанных данных за счет добавления новых координатных функций [22].

Предварительный сплайн Лагранжа может быть дополнительно улучшен при задании в расчетной программе дополнительных лингвистических переменных как элементов «мягких вычислений» теории нечетких множеств для обеспечения возможности оперативного варьирования контуром траектории с обеспечением увеличения быстродействия расчетов на 15 % в соответствии с результатами авторского исследования [23].

Преимуществами сплайнов Лагранжа являются относительная простота их построения, максимальная гладкость, удовлетворительные интерполяционные свойства, а также доступная точность восстановления априорно заданных функций [24]. Вследствие возможности моделирования сложных траекторий кубические сплайны лагранжевого типа представляют практический интерес ввиду гладкой адаптации параметров формы исходной функции за счет обеспечения на локальном уровне таких геометрических свойств унифицированного вида, как гибкость натяжения интерполятора, выпуклость, положительность и монотонность [25].

Интерполянты в акценте реализации условия математического атрибута *гладкости* успешно используются для сплайн-всплесковой обработки потоков структурированной числовой информации⁷. С позиций инновационного подхода самостоятельный интерес применения алгоритма усматривается при дискретизация аналогового сигнала, представляющего фактические значения генерирующей функции. В этом случае выгодно использовать вэйвлетную реконструкцию *псевдоднепрерывности* сплайнов лагранжевого типа. Оптимальное управление динамических систем эффективно формализуется на основе *классического формализма Лагранжа*⁸. Основной задачей перспективных математических методов является разработка адаптивных алгоритмов декомпозиции объема исходного числового потока за счет выявления и сокращения несущественных частей пространственной и временной структуры поступающей информации.

Обсуждение (Discussion)

Фактор внутренней геометрии синтезированной траектории динамических систем в виде геометрической «гладкости» играет решающую роль для применимости интеллектуальных технологий в аспекте планирования траекторий в среде с препятствиями [1]. Под математической «гладкостью» традиционно подразумевается успешность функциональной дифференцируемости. Важнейшее практическое свойство моделирования генезиса плавности маршрутизации определяется кусочной архитектурой сплайна, восстанавливающего навигационную функцию группой

⁷ Сплайн-всплесковая обработка потоков структурированной информации / И. Г. Бурова, Ю. К. Демьянович, Т. О. Евдокимова, О. Н. Иванцова. СПб.: СПбГУ, 2021. 331 с.

⁸ *Отман III. А.* Оптимальное управление нелинейных динамических систем на основе классического формализма Лагранжа. Уфа: Символ науки. 2021. № 3. С. 7–12.

сегментных многочленов в соответствии с соблюдением условия «гладкости» при стыковке фрагментов полиномов на сеточных интервалах. В контексте синтеза навигационных траекторий *феномен гладкости* фактически является синонимом плавности моделируемых изолиний [26]. Практический интерес к гладкому восстановлению маршрута судна поддерживается намерением добиться совпадения точных и приближенных математических решений в домене навигационной безопасности.

Сплаины Лагранжа обеспечивают минимальные погрешности интерполяции даже если в окрестности левой или правой границы сеточного интервала находится вертикальная асимптота графика моделируемой навигационной функции. К достоинствам сплайнов лагранжева типа следует отнести высокую степень гладкости в смысле практической дифференцируемости. Апроксимированные сплайны являются перспективным инструментом интерполяции любых навигационных функций. Хорошие дифференциальные свойства и устойчивая алгоритмичность делают аппарат кубических сплайнов Лагранжа универсальным инновационным средством обработки маршрутной информации.

Кубический сплайн лагранжевого типа формализуется кусочно-полиномиальной дважды непрерывно дифференцируемой функцией при неизбежном условии однократности дефекта «гладкости» на минимальном компактном носителе. Производные первого и второго порядка сплайна третьей степени непрерывны. Так как движение любого реального объекта традиционно характеризуется не только мгновенной скоростью движения по траектории, но и непрерывным ускорением, необходимо моделировать траектории кубическими сплайн-функциями, имеющими непрерывную производную до второго порядка [27]. Данному условию однозначно отвечает кубический сплайн Лагранжа с максимально возможным классом «гладкости», обеспечивающий наличие функциональной непрерывности до вторых производных включительно в серии точек «склейки» кусочной конструкции. Непрерывность вторых производных сплайновой многозвенной конструкции лагранжевого типа третьей степени гарантированно обеспечивается в точках соединения фрагментов траектории движения судна.

В контексте вопроса формализации восстанавливаемого кубическим сплайном математического объекта допускается вероятность кривизны изгиба «гладкой» кривой с допустимым максимумом однократного разрыва третьей производной функции. Во многих практических случаях геометрическая адаптация с условием нарушения исключительности непрерывности третьей производной критически важна для качественного моделирования плавных алгебраических линий, поскольку интерполируемые сплайнами функции, как правило, являются непрерывными [15]. Необходимо стремиться к хорошей гладкости контуров, формируемых на основе кубических сплайнов при достижимости плавного изменения кривизны за счет обеспечения непрерывности плоских кривых. Гибкость плоских кривых следует из архитектуры сплайн-функции, представляющей собой набор полиномов, соединяемых в узловых точках по координатам, а также по первой и второй производной.

Однократный дефект во внутренних точках сегментных соединений однозначно не гарантирует стратегической «гладкости» сплайна в контексте минимума кривизны вдоль алгебраической линии на всем диапазоне восстановления. Дифференцируемость вторых производных в точках многозвенного соединения однозначно не создает «гладкости» кубического сплайна в смысле приближения минимума кривизны искусственно синтезируемой плоскостной траектории, проходящей через цепь опорных точек. Дополнительно для получения минимума кривизны или максимума «гладкости» в соответствии с *гипотезой Шёнберга* необходимо обеспечить правильную организацию дискретной последовательности сеточных узлов. Чтобы сглаживание пути с помощью сплайна обеспечивало непрерывное изменение кривизны траектории, необходимо не менее пяти контрольных точек [1]. Чем больше контрольных точек, тем больше степеней свободы в выборе формы алгебраической кривой, но при этом число сплайновых коэффициентов для такой линии увеличивается, так что возрастает вычислительная сложность напряженного сплайна. Вследствие учета данного факта предусматривается минимизирование сплайновых коэффициен-

тов для каждого интервального отрезка интерполяции за счет правильного выбора интервала изменения математических сегментных параметров и специальных граничных условий для точного воспроизведения наклонов алгебраической кривой в концевых участках аргументации навигационной функции. При оптимальном выборе конструкции кусочной интерполяции обеспечивается последовательное соединение фрагментарных носителей без фактических вэйвлетных всплесков, что гарантированно формирует плавную сплайн-траекторию запланированного пути.

Для получения оптимальной интерполяции с математической точки зрения крайне выгодно использовать кусочные полиномы третьей степени. Фактически кубический сплайн задает своими конструктивными особенностями идеальный вариант приближения, так как применение сплайна меньшей степени может привести к возможности расходимости самого процесса интерполяции ввиду понижения «гладкости» алгебраической кривой. Сегментированность эффективным математическим образом формирует лучшие дифференциальные свойства синтезируемой навигационной траектории. Лидирующая роль кубических сплайнов показательно проявляется при компьютерной визуализации программных алгоритмов удобочитаемостью графических визуализаций.

Метод итерационной настройки изгиба кубического сплайна с использованием постулата «гладкости» для обхода запретных районов плавания позволяет интерактивным образом уточнять траекторию для более точного планирования безопасного пути с уклонением от запретных районов плавания в неструктурированной конфликтной среде [26]. Тактически сплайновая кривая строится, модифицируется и управляется контрольными точками, положение которых может задаваться пользователем в интерактивном режиме в соответствии с требованиями конкретики навигационной задачи. Изменение позиций маркерных позиций приводит к синхронному изменению формы кривой, что позволяет пользователю тактически гибко настраивать виртуальную формы генерируемой линии.

Теоретически элементы сплайнового многозвенника могут быть условно «склеены» между собой в узлах сетки до разной степени «гладкости». Математически допускаются разрывы высших производных. Поскольку для оптимальности траектории необходима *дифференцируемая функция*, следует обратиться к кубическим сплайнам как чрезвычайно гибкой конструкции, позволяющей осуществить наилучшие приближения сложных геометрических линий. Концептуально интерполирующая сплайн-функция организована из цепочки полиномов с обязательным условием надежной «склейки» соседних в последовательности полиномов таким образом, что сплайновые коэффициенты и значения их производных на сеточных «стыках» абсолютно совпадают для обеспечения реалистичности генезиса плавности траектории. Моделирование показывает, что подход с использованием сплайнов третьей степени максимально улучшает качество *гладкости маршрута* с точки зрения оптимальности длины при достижимости минимальной кривизны траектории [28].

При решении задач синтеза траекторий, безусловно, важным является формирование изначального правильного суждения об изогометрической близости приближаемой и приближающих функций при условии предоставления конкретных сведений о дифференциальных свойствах линий пути. С целью заблаговременного выяснения сведений о дифференциальных свойствах восстанавливаемого математического объекта разработана авторская методика качественного исследования дифференциальных свойств изолиний для принципиального устранения факта непрактичности полиномиальной интерполяции для класса дифференцируемых функций с минимизированной «гладкостью» [29]. Предполагается, что структура графической модели объекта исследования и характеристики теории приближения функций должны быть заблаговременно согласованы при формировании единого информационного подхода. Формализуемый вариационный метод позволит синтезировать навигационную траекторию с гарантированными лучшими дифференциальными свойствами.

Исследования дифференциальных свойств криволинейных траекторий с восстановлением методами сплайн-функций информации, заложенной непосредственно в структуре изолиний как отдельных геометрических объектов, обеспечивают успешность процесса моделирования безопасного маршрута судна. Апробированное создание итерационных плавных траекторий пред-

ставляется чрезвычайно важным для достижения стабильного движения мобильных объектов в конфликтной навигационной среде с учетом реализуемой оперативной возможности уклонения от запретных районов плавания.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Основным фактором реализации задачи построения гибкой конфигурации сплайновой линии пути следует признать в качестве систематизированного критерия оптимизации феномен математической плавности.

2. Формализация движения судна на основе алгоритма интерполяции сплайнами лагранжева типа обоснована предпочтительностью обеспечения максимальной «гладкости» маршрутной линии пути, что демонстрируется графическим сопровождением итерационного построения программируемой траектории с целью обеспечения ситуационной осведомленности судоводителя об успешности маршрутизации судна с достижимостью адаптации метода к оперативной вариативности при высокой точности и устойчивости вычислительных процедур.

3. Целесообразность использования сплайнов лагранжевого типа рассматриваются двояко: как перспективная альтернатива *B*-сплайнам, так и как вариант усиления точечной интерполяции при комбинированной структуре алгоритма с целью максимального извлечения преимуществ практического применения теории приближения функций для достижимости безопасного пути движения судна. В условиях недостаточности адекватной навигационной информации гибридный алгоритм комплексирования *B*-сплайнов и сплайнов Лагранжа является надежным вариантом успешного моделирования траектории любой сложной конфигурации.

4. Разработанная программно-ориентированная платформа моделирования с пользовательским интерфейсом адекватно синтезирует на основе кубических сплайнов лагранжевого типа итерацию криволинейной траектории с интерактивной возможностью геометрической интерпретации решения поставленной задачи в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // Математика и математическое моделирование. — 2018. — № 1. — С. 15–58. — EDN YWFAYD. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.
2. Zhuk A. S. Guaranteed Safe States in Speed Space for Ships Collision Avoidance Problem / A. S. Zhuk // Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems — Springer Nature Switzerland, 2023. — Pp. 441–449. DOI: 10.1007/978-3-031-34127-4_43.
3. Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. МIRONENKO // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. — EDN THCPAH. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
4. МIRONENKO А. А. Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. МIRONENKO. — Новосибирск: Государственный морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2016. — EDN KUKJFE.
5. Карпов А. В. Интерполирование траекторий и синтез параметров управляющих воздействий приводов беспилотных систем степенными сплайнами / А. В. Карпов, Н. И. Гданский, В. А. Каргин, К. М. Усанов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. — 2025. — Т. 72. — № 2(59). — С. 117–124. — EDN ZZABHP. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-117-124.
6. Гриняк В. М. Управление движением беспилотника по программной траектории на основе машинного обучения / В. М. Гриняк, К. С. Шутов, А. С. Девятисильный, А. В. Артемьев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2025. — Т. 27. — № 1. — С. 66–76. — EDN ITNXPA. DOI: 10.18127/j19998554-202501-06.
7. Жук А. С. Итеративный метод планирования движения судна в непредсказуемой навигационной обстановке / А. С. Жук // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1(61). — С. 179–187. — EDN NZEVWK. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.018.

8. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. — EDN PZAOIV. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
9. Livshits L. P. Quasilinear Interpolation by Minimal Splines / L. P. Livshits, A. A. Makarov, S. V. Makarova // Journal of Mathematical Sciences. — 2024. — Vol. 281. — Is 2. — С. 285–296. DOI: 10.1007/s10958-024-07101-4.
10. Ward J. P. Interpolating splines on graphs for data science applications / J. P. Ward, F. J. Narcowich, J. D. Ward // Applied and Computational Harmonic Analysis. — 2020. — Vol. 49. — Is. 2. — Pp. 540–557. DOI: 10.1016/j.acha.2020.06.001.
11. 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. — EDN PSJYOY. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
12. Kvasov B. I. Approximation by Lagrange splines / B. I. Kvasov, A. Luadsong // Proceedings of the Fourth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering — Bangkok: Kasetsart University, 2000. — С. 303–315.
13. Dem'yanovich Y. K. Minimal splines of Lagrange type / Y. K. Dem'yanovich // Journal of Mathematical Sciences. — 2010. — Vol. 170. — Is. 4. — Pp. 444–495. DOI: 10.1007/s10958-010-0096-6.
14. 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. — EDN JYHSIY. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
15. Dem'yanovich Yu. K. On General Smoothness of Minimal Splines of the Lagrange Type / Yu. K. Demyanovich, T. O. Evdokimova, E. V. Prozorova // WSEAS Transactions on Mathematics. — 2018. — Vol. 17. — Pp. 304–310.
16. Ююкин И. В. Синтез кубическими сплайнами искаженной изолинии в аспекте использования дифференциального режима спутниковой навигации / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 341–358. — EDN JJUGRO. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.
17. Volkov Y. S. Estimates of Solutions to Infinite Systems of Linear Equations and the Problem of Interpolation by Cubic Splines on the Real Line / Y. S. Volkov, S. I. Novikov // Siberian Mathematical Journal. — 2022. — Vol. 63. — Is. 4. — Pp. 677–690. DOI: 10.1134/S0037446622040085.
18. Шихшинатова М. М. Задачи приближения функций: от лагранжевых к серендиповым полиномам / М. М. Шихшинатова // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. — 2022. — Т. 37. — № 3. — С. 34–41. — EDN XMWGKM. DOI: 10.21779/2542-0321-2022-37-3-34-41.
19. Babic D. Optimized Lagrange and spline-based interpolators / D. Babic // Proceedings of Papers 5th European Conference on Circuits and Systems for Communications (ECCSC'10) — 2010. — Pp. 290–293.
20. Diyachuk A. Comparative Analysis of Optimal Path Planning Algorithms Using Deep Learning Technique / A. Diyachuk // 2024 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI) — 2024. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCSI62669.2024.10799336.
21. Ююкин И. В. Сплайновая реконструкция эталона информативности в задачах корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 233–253. — EDN OWLOHJ. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253.
22. Dem'yanovich Yu. K. Adaptive Refinement of the Variational Grid Method / Yu. K. Dem'yanovich, N. A. Lebedinskaya, A. N. Terekhov // WSEAS Transactions on Systems and Control. — 2022. — Vol. 17. — Pp. 527–534. DOI: 10.37394/23203.2022.17.58.
23. Ююкин И. В. Комплексирование методов сплайн-функций и нечеткой логики для решения сложных задач судовождения / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 653–671. — EDN EGJBTH. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-653-671.
24. Belyakova O. V. On Implementation of Non-Polynomial Spline Approximation / O. V. Belyakova // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2019. — Vol. 59. — Is. 5. — Pp. 689–695. DOI: 10.1134/S096554251905004X.
25. Bogdanov V. V. Interpolation By Cubic Tension Splines With Convexity Inheritance / V. V. Bogdanov, Yu. S. Volkov // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. — 2025. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 37–49. DOI: 10.32523/2306-6172-2025-13-1-37-49.

26. Ююкин И. В. Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. — EDN VCRDTK. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.

27. Назаров А. И. Применение кубического сплайна и трехгранника Френе для построения маршрута пролета летательного аппарата / А. И. Назаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 2. — С. 137–140. — EDN GQNTJI. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-2-137-141.

28. Ahmed A. Path Smoothing Algorithm Using Thin-Plate Spline / A. Ahmed, A. Soliman, A. Maged, M. Gaafar, M. Magdy // 2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR) — 2021. — Рр. 349–353. DOI: 10.1109/ICCAR52225.2021.9463453.

29. Ююкин И. В. Исследование дифференциальных свойств навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 515–533. — EDN DUSTFN. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-515-533.

REFERENCES

1. Lyu, V. “Path planning methods in an environment with obstacles (a review).” *Mathematics and Mathematical Modelling* 1 (2018): 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.

2. Zhuk, A. S. “Guaranteed Safe States in Speed Space for Ships Collision Avoidance Problem.” *Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems*. Springer Nature Switzerland, 2023: 441–449. DOI: 10.1007/978-3-031-34127-4_43.

3. Vas'kov, A. S. and A. 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.

4. Mironenko, A. A. Metodologiya formalizatsii navigatsionnoy obstanovki, planirovaniya marshruta i programmnykh traektoriy dvizheniya sudna. Grand PhD diss. Novorossiysk, 2016.

5. Karpov, A. V., N. I. Gdanskiy, V. A. Kargin and K. M. Usanov. “Interpolation of trajectories and synthesis of parameters of control actions of drives of unmanned systems by power splines.” *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture* 72.2(59) (2025): 117–124. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-117-124.

6. Grinyak, V. M., K. S. Shutov, A. S. Devyatisil'nyy and A. V. Artem'ev. “Autonomous vehicle motion control along a program trajectory based on machine learning.” *Neurocomputers* 27.1 (2025): 66–76. DOI: 10.18127/j19998554-202501-06.

7. Zhuk, A. S. “Iterative method for ship motion planning in unpredictable navigational environment.” *Marine Intelligent Technologies* 3–1(61) (2023): 179–187. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.018.

8. Yuyukin, I. V. “Interpolation of the navigational function by the lagrange type spline.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.

9. Livshits, L. P., A. A. Makarov and S. V. Makarova. “Quasilinear Interpolation by Minimal Splines.” *Journal of Mathematical Sciences* 281.2 (2024): 285–296. DOI: 10.1007/s10958-024-07101-4.

10. Ward, J. P., F. J. Narcowich and J. D. Ward. “Interpolating splines on graphs for data science applications.” *Applied and Computational Harmonic Analysis* 49.2 (2020): 540–557. DOI: 10.1016/j.acha.2020.06.001.

11. Yuyukin, I. 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.

12. Kvasov, B. I. and A. Luadsong. “Approximation by Lagrange splines.” *Proceedings of the Fourth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering* Bangkok: Kasetsart University, 2000: 303–315.

13. Dem'yanovich, Y. K. “Minimal splines of Lagrange type.” *Journal of Mathematical Sciences* 170.4 (2010): 444–495. DOI: 10.1007/s10958-010-0096-6.

14. Yuyukin, I. 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.

15. Demyanovich, Yu. K., T. O. Evdokimova and E. V. Prozorova. “On General Smoothness of Minimal Splines of the Lagrange Type.” *WSEAS Transactions on Mathematics* 17 (2018): 304–310.

16. Yuyukin, I. V. "Cubic splines synthesis of a distorted isoline in the aspect of using differential mode of satellite navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.
17. Volkov, Y. S. and S. I. Novikov. "Estimates of Solutions to Infinite Systems of Linear Equations and the Problem of Interpolation by Cubic Splines on the Real Line." *Siberian Mathematical Journal* 63.4 (2022): 677–690. DOI: 10.1134/S0037446622040085.
18. Shikhshinatova, M. M. "Problems of approximation of functions from lagrangian to serendipal polynomials." *Herald of Dagestan State University. Series I. Natural Sciences* 37.3 (2022): 34–41. DOI: 10.21779/2542-0321-2022-37-3-34-41.
19. Babic, Djordje. "Optimized Lagrange and spline-based interpolators." *Proceedings of Papers 5th European Conference on Circuits and Systems for Communications (ECCSC'10)*. — IEEE, 2010. 290–293.
20. Diyachuk, A. "Comparative Analysis of Optimal Path Planning Algorithms Using Deep Learning Technique." *2024 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)* —. 2024: 1–6. DOI: 10.1109/ICCSI62669.2024.10799336.
21. Yuyukin, I. V. "Spline reconstruction of the informativeness template in correlation-extreme navigation tasks." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253.
22. Dem'yanovich, Yu. K., N. A. Lebedinskaya and A. N. Terekhov. "Adaptive Refinement of the Variational Grid Method." *WSEAS Transactions on Systems and Control* 17 (2022): 527–534. DOI: 10.37394/23203.2022.17.58.
23. Yuyukin, I. V. "Integration of spline function methods and fuzzy logic for solving complex navigation problems." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 653–671. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-653-671.
24. Belyakova, O. V. "On Implementation of Non-Polynomial Spline Approximation." *Computational Mathematics and Mathematical Physics* 59.5 (2019): 689–695. DOI: 10.1134/S096554251905004X.
25. Bogdanov, V. V. and Yu. S. Volkov. "Interpolation By Cubic Tension Splines With Convexity Inheritance." *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 13.1 (2025): 37–49. DOI: 10.32523/2306-6172-2025-13-1-37-49.
26. Yuyukin, I. V. "Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of no-go areas in due time." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.
27. Nazarov, A. I. "The use of a cubic spline and a fresne trihedron to plot the flight route of an aircraft." *Izvestiya Tula State University* 2 (2022): 137–140. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-2-137-141.
28. Ahmed, A., M. Magdy et al. "Path Smoothing Algorithm Using Thin-Plate Spline." *2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)* —. 2021: 349–353. DOI: 10.1109/ICCAR52225.2021.9463453.
29. Yuyukin, I. V. "Research of the differential properties of the navigational isosurface." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 515–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-515-533.

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 in Technical Sciences, 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 05 ноября 2025 г.
Received: Nov. 5, 2025.

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА БЕРЕГОВЫХ ОРИЕНТИРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СУДНА ПРИ РЕЗЕРВИРОВАНИИ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

А. Н. Штанько

Войсковая часть 84841, Анапа, Российская Федерация

В работе рассматривается задача определения географических координат береговых ориентиров по результатам угловых визуальных наблюдений, выполняемых с судна в процессе движения вдоль береговой черты. Получение координат ориентиров рассматривается как этап эталонной визуальной съемки, выполняемой при наличии достоверной информации о координатах точек наблюдения, определяемых с использованием глобальных навигационных спутниковых систем. Сформированный в ходе эталонной съемки набор ориентиров предназначен для последующего использования в системах визуального позиционирования судна в условиях возможного ухудшения или отсутствия спутниковых навигационных сигналов. Предложена модель формирования визуальных пеленгов на береговые ориентиры по данным судовой видеосъемки, рассмотрены два подхода к определению их координат: плоская модель пересечения линий положения с уравниванием методом наименьших квадратов и сферическая модель, основанная на решении задач сферической тригонометрии и прямой геодезической задачи. Проведена экспериментальная проверка методики на основе реальных данных эталонной визуальной съемки в прибрежной зоне. Показано, что при вытянутой геометрии точек наблюдения и малых углах пересечения визуальных пеленгов плоская модель приводит к существенным погрешностям определения координат береговых ориентиров. Использование сферической постановки задачи позволяет повысить устойчивость решения и уменьшить фактическую погрешность определения координат. Полученные результаты подтверждают возможность формирования базы опорных визуальных ориентиров, пригодной для применения в системах резервного навигационного обеспечения и визуального позиционирования судна в стесненных прибрежных акваториях, а также могут быть использованы при разработке систем автономного судовождения, основанных на методах технического зрения.

Ключевые слова: техническое зрение, визуальная навигация, триангуляция, линии положения, сферическая тригонометрия, резервное навигационное обеспечение, судовождение, визуальные ориентиры, радиоэлектронное воздействие, определение координат.

Для цитирования:

Штанько А. Н. Формирование набора береговых ориентиров для систем визуального позиционирования судна при резервировании систем спутниковой навигации / А. Н. Штанько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 250–260. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-250-260. — EDN GGIRWG.

FORMATION OF A SET OF COASTAL LANDMARKS FOR SHIP VISUAL POSITIONING SYSTEMS UNDER SATELLITE NAVIGATION SYSTEM REDUNDANCY

A. N. Shtanko

Military unit 84841, Anapa, Russian Federation

The paper considers the problem of determining the geographical coordinates of coastal landmarks based on the results of angular visual observations performed from a vessel while moving along the coastline. The determination of landmark coordinates is considered as a stage of a reference visual survey carried out under the availability of reliable information on the coordinates of observation points obtained using global navigation satellite systems. The set of landmarks formed during the reference survey is intended for subsequent use in ship visual positioning systems under conditions of possible degradation or absence of satellite navigation signals.

A model for forming visual bearings to coastal landmarks based on onboard video data is proposed, and two approaches to determining their coordinates are considered: a planar model of intersection of lines of position with least squares adjustment and a spherical model based on solving problems of spherical trigonometry and the direct geodetic problem. Experimental validation of the methodology is carried out using real data from a reference visual survey in the coastal zone. It is shown that with elongated geometry of observation points and small intersection angles of visual bearings, the planar model leads to significant errors in determining the coordinates of coastal landmarks. The use of a spherical formulation of the problem makes it possible to increase solution stability and reduce the actual coordinate determination error. The obtained results confirm the possibility of forming a database of reference visual landmarks suitable for use in backup navigation systems and ship visual positioning in restricted coastal waters, and can also be applied in the development of autonomous navigation systems based on computer vision methods.

Keywords: computer vision, visual navigation, triangulation, lines of position, spherical trigonometry, backup navigation, ship navigation, visual landmarks, electronic interference, coordinate determination.

For citation:

Shtanko, A. N. "Formation of a set of coastal landmarks for ship visual positioning systems under satellite navigation system redundancy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 250–260. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-250-260.

Введение (Introduction)

Функционирование современных навигационных систем непосредственно связано с использованием спутниковых технологий глобального позиционирования (GNSS), обеспечивающих высокую точность определения координат. В современных условиях нестабильной геополитической обстановки и локальных военных конфликтов спутниковые системы все чаще становятся объектом целенаправленного радиоэлектронного воздействия, включая подавление сигналов и имитацию ложных координат. В связи с этим возрастает необходимость разработки резервных систем определения места, способных функционировать автономно на этапе эксплуатации без обращения к внешним радиосигналам. Одним из перспективных направлений является использование методов технического зрения для определения местоположения судна по видеоданным, получаемым с навигационных камер при условии наличия заранее сформированного набора опорных визуальных ориентиров.

В последнее десятилетие задачи визуальной навигации и позиционирования по цифровым изображениям активно развиваются в различных областях техники — от автономных транспортных средств до робототехнических комплексов и подводных аппаратов. Общим направлением этих исследований является использование камеры как навигационного датчика, способного обеспечивать определение положения и ориентацию объекта в пространстве.

В работе [1] систематизированы подходы к визуальной локализации камеры по изображениям, включая методы решения задачи Perspective-n-Point (PnP), алгоритмы одновременной локализации и построения карты (SLAM), а также способы геопривязки изображений по известным ориентирам. Авторы работы [1] отмечают, что визуальная информация позволяет получать устойчивое позиционирование даже при полном отсутствии спутниковых сигналов.

Для наземных и полевых роботов методы триангуляции и визуальной локализации получили развитие в работах [2–3], в которых предложена система визуального позиционирования на основе пеленгации по естественным ориентирам. Несмотря на иное назначение (наземные роботы) математические принципы полностью применимы и к морской среде.

В отечественных исследованиях вопросы визуальной навигации рассмотрены в работе [4], в которой предложен метод навигации автономного подводного аппарата с использованием корреляции изображений для восстановления траектории. Несмотря на то, что задача решалась в подводных условиях, принципы обработки изображений и извлечения устойчивых ориентиров схожи с применением в прибрежной навигации.

Дополнительный обзор алгоритмов визуальной навигации и планирования пути выполнен в исследованиях [5–6], где отмечается, что применение методов компьютерного зрения

в навигационных системах требует накопления эталонных данных и разработки процедур сопоставления изображений с ранее полученными картами местности.

В работах [7–10] предложены и исследованы методы определения навигационных параметров судна по цифровым изображениям, включая алгоритмы обнаружения и идентификации береговых средств навигационного оборудования (СНО) с применением дескрипторного анализа и нейросетевых моделей. Эти решения показали высокую точность при наличии в видео-ряде СНО с известными характеристиками. Однако наличие таких ориентиров характерно не для всех участков побережья, в некоторых местах СНО могут вообще отсутствовать. В этих условиях применение методов, основанных на идентификации известных объектов, становится невозможным.

Современные системы компьютерного зрения позволяют автоматически выделять на изображениях визуально устойчивые и приметные элементы рельефа и застройки. Однако практическое использование таких элементов в навигационных задачах требует предварительного определения их географических координат и формирования набора опорных точек, пригодных для последующего позиционирования судна.

В настоящей работе рассматривается задача определения координат отдельных береговых ориентиров по результатам угловых визуальных наблюдений, выполняемая в рамках эталонной визуальной съемки береговой зоны с целью формирования набора опорных ориентиров для последующего визуального позиционирования судна. Предложена математическая модель триангуляции ориентира по известным координатам судна и измеренным азимутам на объект, а также проведена экспериментальная проверка и дана оценка точности полученных координат.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предварительную исследовательскую съемку береговой черты предлагается выполнять с судна, оснащенного откалиброванной видеосистемой и средствами точного определения координат в зонах стесненного плавания, которые включают каналы, узкости, шхеры, акватории портов и гаваней с подходами к ним, а также устьевые участки судоходных рек. Плавание в таких зонах отличается ограниченной свободой маневра и требует повышенного контроля за местоположением судна.

Под береговым ориентиром понимается визуально устойчивый и приметный элемент естественного или искусственного рельефа, наблюдаемый на изображениях береговой черты и сохраняющий свои визуальные характеристики при изменении точки наблюдения (рис. 1).

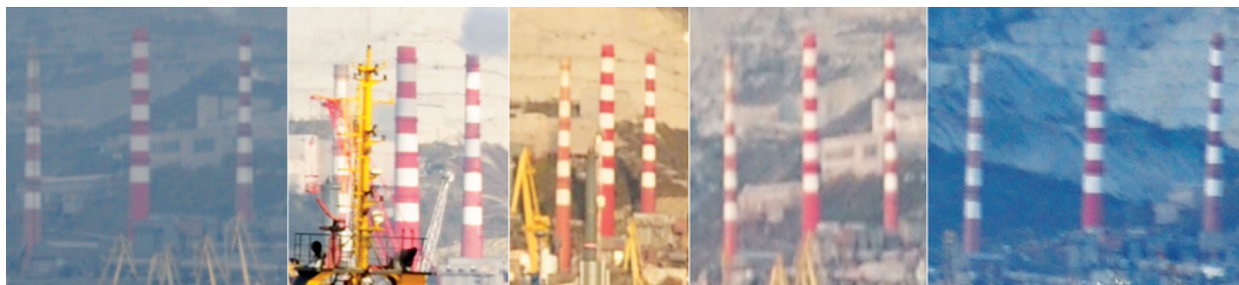


Рис. 1. Визуально устойчивые береговые ориентиры
Fig. 1. Visually stable coastal landmarks

В процессе исследовательского (эталонного) прохода судна выполняется видеосъемка береговой черты, в результате которой определяется набор кадров, на которых автоматически или вручную выделяются ключевые точки — визуально устойчивые и приметные элементы берегового рельефа (рис. 1), соответствующие различным моментам времени t_i и различным положениям судна φ_i , λ_i (рис. 2). Траектория движения судна при этом не предполагается заранее заданной и определяется реальной навигационной обстановкой.

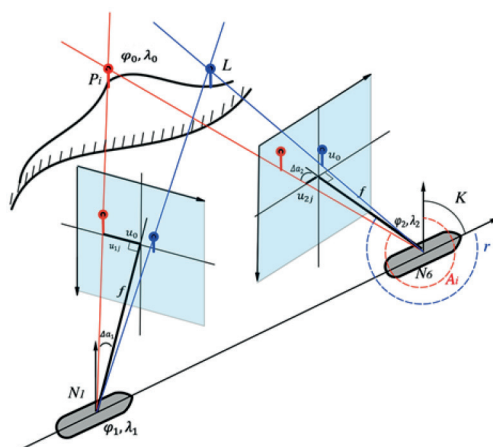


Рис. 2. Определение географических координат ключевой точки
Fig. 2. Determination of the geographical coordinates of a key point

Каждая ключевая точка, наблюдаемая в нескольких последовательных кадрах, формирует набор измерений, связывающих положения судна и направления на ориентир. Для любой выбранной точки j имеем совокупность наблюдений:

$$U_j = \{(\varphi_i, \lambda_i, K_i, u_{ij})\}, i = 1, 2, \dots, n_j, \quad (1)$$

где u_{ij} — горизонтальная координата ориентира на изображении в i -м кадре; n_j — число наблюдений данной точки.

Для перехода от пиксельных координат к направлению визирования используется известная модель центральной проекции [9]. Если u_0 — координата оптического центра изображения, мм, f — фокусное расстояние камеры, мм, то угол визирования относительно продольной оси судна равен:

$$\Delta a_i = \arctan\left(\frac{u_{ij} - u_0}{f}\right), \quad (2)$$

а полный азимут на ориентир

$$A_i = K_i + r + \Delta a_i, \quad (3)$$

где r — угол между диаметральной плоскостью судна и оптической осью снимка.

Если ориентир наблюдался из двух различных положений судна φ_1, λ_1 и φ_2, λ_2 , то его координаты (φ_0, λ_0) находятся как точка пересечения соответствующих линий, что соответствует классическим подходам визуальной триангуляции [3]:

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_1 + \tan(A_1)(\varphi - \varphi_1); \\ \lambda = \lambda_2 + \tan(A_2)(\varphi - \varphi_2), \end{cases} \quad (4)$$

где φ, λ — произвольная точка на азимуте.

Решив систему (4), получим аналитические выражения:

$$\varphi_0 = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) + \varphi_1 \tan A_1 - \varphi_2 \tan A_2}{\tan A_1 - \tan A_2}; \quad \lambda_0 = \lambda_1 + \tan A_1 (\varphi_0 - \varphi_1). \quad (5)$$

Это решение определяет географические координаты ориентира при наличии двух независимых наблюдений. На практике ориентир фиксируется в нескольких кадрах, поэтому получим $n > 2$ пеленгов.

Для повышения точности координаты ориентира φ_0, λ_0 определяются методом наименьших квадратов из системы, широко применяемом при решении задач визуальной локализации и геопривязки изображений [1]:

$$\lambda_i - \lambda_0 = \tan(A_i)(\varphi_0 - \varphi_i).$$

Каждое уравнение можно привести к виду

$$-\tan(A_i)\varphi_0 + \lambda_0 = -\tan(A_i)\varphi_i + \lambda_i. \quad (6)$$

В матричной форме:

$$A_p = b, \quad A = \begin{bmatrix} -\tan A_1 & 1 \\ -\tan A_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\tan A_n & 1 \end{bmatrix}; \quad p = \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} -\tan A_1 \varphi_1 + \lambda_1 \\ -\tan A_2 \varphi_2 + \lambda_2 \\ \vdots \\ -\tan A_n \varphi_n + \lambda_n \end{bmatrix}.$$

Оценка координат определяется стандартным выражением:

$$\hat{p} = (A^T W A)^{-1} A^T W b; \quad W = \frac{1}{\sigma_A^2} I, \quad (7)$$

где W — матрица весов наблюдений; σ_A — среднеквадратическая погрешность (СКП) азимута; I — единичная матрица размерности $n \times n$.

Такое решение минимизирует среднеквадратичные расхождения между пеленгами и устойчиво при небольших погрешностях угловых измерений. Таким образом, на основе измеренных азимутов A_i и координат судна φ_i, λ_i формируются уравнения пеленгов, по пересечению которых вычисляются координаты берегового ориентира.

Результаты (Results)

Для проверки работоспособности предложенной методики и оценки точности определения координат береговых ориентиров была проведена серия экспериментальных расчетов на основе реальных данных наблюдений. Исследование выполнялось на участке береговой черты, в пределах которых судно выполняло проход с одновременной видеосъемкой побережья.

Для оценки влияния геометрической модели на точность определения координат ориентиров экспериментальные данные были обработаны с использованием двух подходов. Первый подход, основанный на плоской аппроксимации, предполагает пересечение линий положения с последующим уравниванием методом наименьших квадратов. Второй подход реализует сферическую постановку задачи, учитывающую кривизну Земли и основанную на решении задач сферической тригонометрии.

В качестве исходных данных использовалась серия из шести точек наблюдения, координаты которых φ_i, λ_i определялись по данным спутниковой навигации. Для компенсации отсутствующего во время съемок высокоточного компаса абсолютные азимуты направлений на устойчивые объекты (см. рис. 1) непосредственно не измерялись. Вместо этого для каждого кадра по выражению (2) определялся относительный горизонтальный угол визирования Δa_i между счислимым пеленгом P_c на опорный объект L с известными географическими координатами и направлением на ориентир (см. рис. 2). Подобный принцип соответствует современным методам визуальной навигации, использующим относительные измерения направлений [2, 6].

Реализация первого подхода осуществлялась на основе сформированного набора азимутов наблюдения, полученных по данным видеосъемки. С каждого кадра видеосъемки для каждого ориентира: P_1, P_2, P_3 (см. рис. 1) был сформирован набор азимутов наблюдения (рис. 3):

$$A_i = P_{ci} + \Delta a_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где n — количество использованных наблюдений.

СКП измерения азимута для всех наблюдений принималась одинаковой и равной $\sigma_A = 0,6^\circ$, в соответствии с условиями пеленгования.

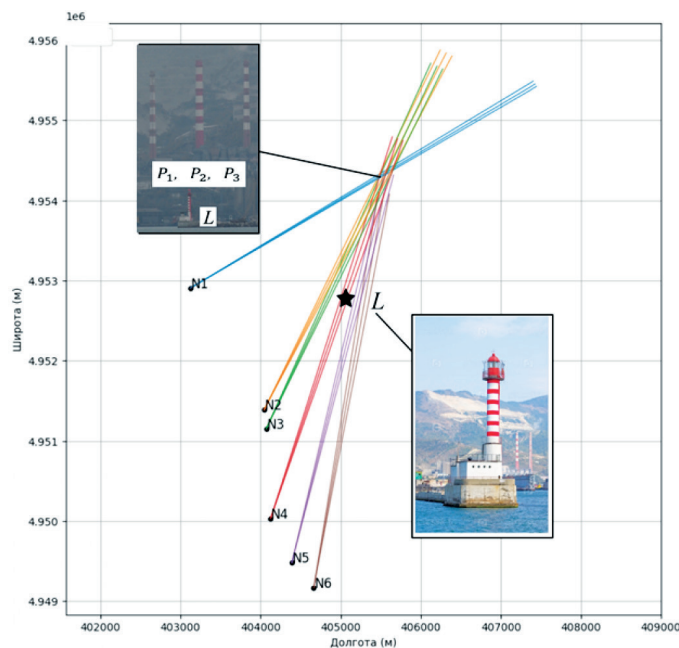


Рис. 3. Экспериментальный набор азимутов на искомые ориентиры
Fig. 3. Experimental set of azimuths to target landmarks

На рис. 4 представлены линии положения (ЛП), соответствующие измеренным азимутам, и их пересечения для трех ориентиров: P_1 , P_2 , P_3 . Дополнительно приведены среднее значение попарных пересечений, линейная и уточненная нелинейная оценки координат, а также истинное положение ориентиров, используемое для оценки точности метода.

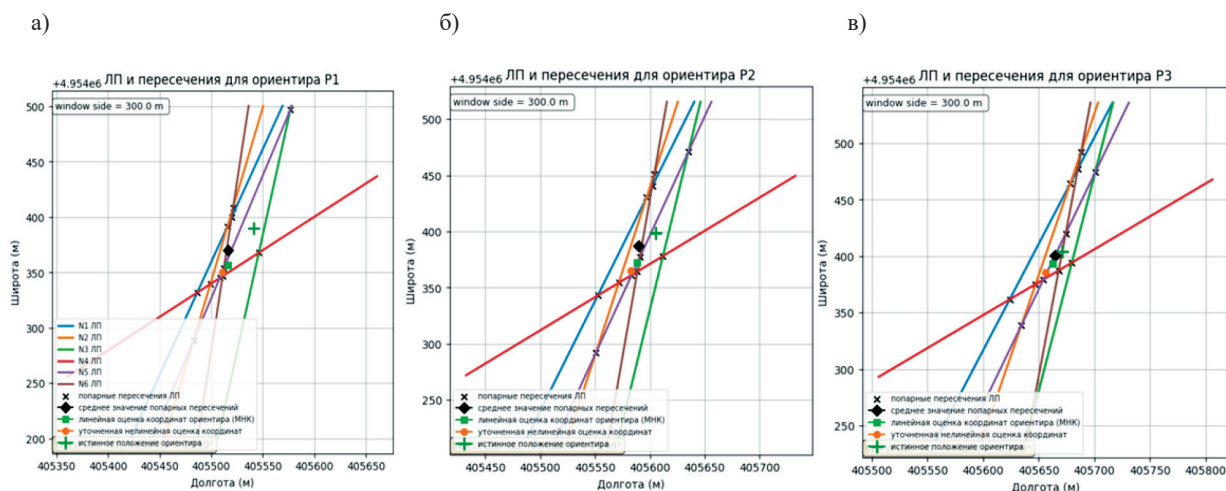


Рис. 4. Геометрическая интерпретация экспериментальных результатов
определения координат ориентиров:

a — ЛП ориентира P_1 ; b — ЛП ориентира P_2 ; c — ЛП ориентира P_3

Fig. 4. Geometric interpretation of experimental results of landmark coordinate determination:

(a) line of position of landmark P_1 ; (b) line of position of landmark P_2 ; (c) line of position of landmark P_3

Для каждого ориентира были рассчитаны остатки наблюдений Δr_i , представляющие собой разность между наблюдаемым и численным значением пеленга, вычисленным по координатам ориентиров (рис. 5). Во всех измерениях абсолютные значения остатков не превышают $0,35^\circ$, что согласуется с принятой СКП измерений. Аналогичный анализ остаточных невязок применяется в задачах визуального позиционирования и калибровки наблюдений [1].

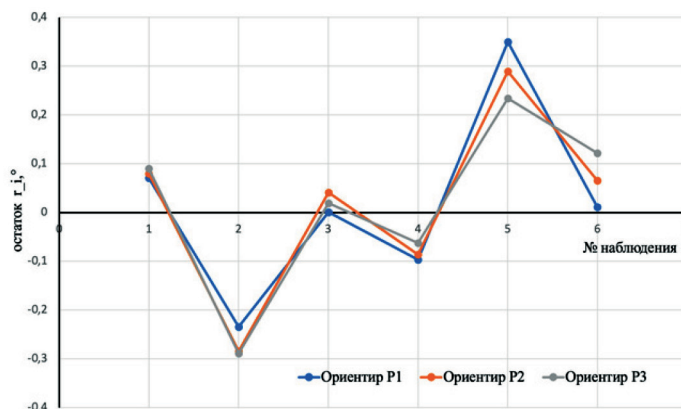


Рис. 5. Разница счислимых и обсервованных наблюдений
Fig. 5. Difference between dead reckoning and observed measurements

Результаты определения и оценки координат ориентиров P_1 , P_2 , P_3 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения и оценки координат ориентиров

Table 1

Results of determination and accuracy assessment of landmark coordinates

Ориентир	$\hat{\phi}(N)$	$\hat{\lambda}(E)$	ΔS , м	СКО _{ост} , м	СКП _{теор} , м	СКП _{эсп} , м
P_1	44°44'10.69"	37°48'23.73"	50,3	0,179	16,3	39,6
P_2	44°44'11.21"	37°48'26.99"	40,26	0,175		
P_3	44°44'11.91"	37°48'30.33"	23,41	0,166		

По результатам уравнивания была получена ковариационная матрица оценок координат ориентиров, на основании которой теоретическая СКП определения положения составила 16,3 м. В то же время фактическая СКП, рассчитанная по отклонению ΔS определенных координат от истинных значений, составила около 40 м. Различия между теоретической и экспериментальной оценками объясняются наличием систематических погрешностей, не учитываемых в принятой модели наблюдений, а также малыми углами пересечения азимутов на искомые ориентиры, которые не компенсируются применением МНК.

С учетом выявленных ограничений первого подхода для повышения точности определения координат ориентиров был реализован второй подход, основанный на сферической геометрии. В этом случае задача формулируется как решение сферического треугольника $\Delta N_1 P N_6$, образованного двумя точками наблюдения судна N_1 , N_6 и искомым ориентиром P (см. рис. 3). При этом учитывается, что крайние точки наблюдений обладают наибольшей базой, что улучшает геометрию задачи и снижает чувствительность решения к угловым погрешностям.

Обозначим элементы сферического треугольника $\Delta N_1 P N_6$:

$$a = \widehat{PN_6}; \quad b = \widehat{PN_1}; \quad c = \widehat{N_1N_6};$$

$$A = \angle PN_1N_6; \quad B = \angle PN_6N_1; \quad C = \angle N_1PN_6.$$

Сторона C вычисляется по известным координатам точек N_1 , N_6 с использованием сферической формулы косинусов:

$$\cos c = \sin \varphi_1 \sin \varphi_6 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_6 \cos(\lambda_6 - \lambda_1). \quad (8)$$

Опорный объект L (см. рис. 3) с известными координатами используем для определения углов при основании. Для этого обозначим элементы и решим сферический треугольник $\Delta N_1 L N_6$:

$$d = \widehat{LN_6}; \quad e = \widehat{LN_1}; \quad g = \widehat{N_1 N_6};$$

$$D = \angle L N_1 N_6; \quad E = \angle L N_6 N_1; \quad G = \angle N_1 L N_6.$$

Стороны d, e, g определим по сферической формуле косинусов (8). Для нахождения углов D, E, G используем сферический закон косинусов для углов. Например, угол при D :

$$\cos D = \frac{\cos d - \cos e \cos g}{\sin e \sin g}. \quad (9)$$

Таким образом, углы A, B сферического треугольника $\Delta N_1 P N_6$ определим как сумму относительного горизонтального угла визирования Δa_i на ориентир P и соответствующего угла $\Delta N_1 L N_6$:

$$B = E + \Delta a_6; \quad A = D + \Delta a_1.$$

Оставшиеся три элемента b, a, C треугольника $\Delta N_1 P N_6$ решаются как задачи сферической тригонометрии. Зная координаты точки N_1 , расстояние b и истинный азимут $A_{N_1 b}$ на искомую точку P , координаты ориентира определяются решением прямой геодезической задачи на сфере:

$$\sin \varphi_P = \sin \varphi_{N_1} \cos b + \cos \varphi_{N_1} \sin b \cos A_{N_1 b}; \quad (10)$$

$$\lambda_P = \lambda_{N_1} + \arctan \frac{\sin A_{N_1 b} \sin b \cos \varphi_{N_1}}{\cos b - \sin \varphi_{N_1} \sin \varphi_P}. \quad (11)$$

Таким образом, полученные результаты обработки экспериментальных наблюдений позволяют проанализировать особенности определения положения ориентиров в рамках рассматриваемых подходов.

Обсуждение (Discussion)

Для каждого из трех ориентиров были получены оценки координат двумя независимыми методами. Результаты вычислений, а также величины фактических погрешностей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения координат ориентиров

Table 2

Results of landmark coordinate determination

Ориентир	Метод решения	$\hat{\varphi}(N)$	$\hat{\lambda}(E)$	ΔS , м	Количество наблюдений
P_1 φ 44°44'12.0"N λ 37°48'25.3"E	Плоский	44°44'10.69"	37°48'23.73"	50,3	6
	Сферический	44°44'12.0"	37°48'25.2"	2,2	2
P_2 φ 44°44'12.3"N λ 37°48'28.4"E	Плоский	44°44'11.21"	37°48'26.99"	40,26	6
	Сферический	44°44'12.5"	37°48'28.6"	7,6	2
P_3 φ 44°44'12.4"N λ 37°48'31.3" E	Плоский	44°44'11.91"	37°48'30.33"	23,41	6
	Сферический	44°44'12.6"	37°48'31.2"	6,6	2

Результаты экспериментальной проверки демонстрируют существенную зависимость точности определения координат береговых ориентиров от используемой геометрической модели.

Несмотря на применение метода наименьших квадратов и увеличение числа наблюдений, плоская модель пересечения линий положения показала ограниченную устойчивость при малых углах пересечения визуальных пеленгов. В этих условиях влияние геометрической вырожденности задачи приводит к доминированию систематических составляющих погрешности.

Полученное расхождение между теоретической и фактической оценками среднеквадратической погрешности в плоской постановке указывает на некорректность исходных допущений о геометрии задачи. В частности, аппроксимация поверхности Земли плоскостью при расстояниях, характерных для прибрежной навигации, приводит к смещению оценок координат, которое не устраняется статистическим уравниванием.

Сферическая постановка задачи, основанная на решении задач сферической тригонометрии и прямой геодезической задачи, позволяет корректно учитывать кривизну Земли и пространственную геометрию линий положения. Необходимость учета пространственной геометрии наблюдений отмечается также в работах по геопривязке видеоданных и сопоставлению изображений с картографическими моделями [6]. Экспериментальные результаты показали, что даже при минимальном числе наблюдений использование сферической модели обеспечивает более устойчивое решение по сравнению с плоским уравниванием при большем количестве пеленгов. Это свидетельствует о том, что корректный выбор математической модели является определяющим фактором точности в условиях неблагоприятной геометрии наблюдений.

Следует отметить, что в рамках выполненного исследования сферическая модель применялась в упрощенной форме, без использования процедуры статистического уравнивания для совокупности наблюдений. Расширение методики в случае многократных измерений с последующим уравниванием в сферической геометрии представляет собой перспективное направление дальнейших исследований и может привести к дополнительному снижению погрешности определения координат ориентиров.

Ограничения предложенного подхода связаны прежде всего с требованиями, предъявляемыми к качеству эталонной визуальной съемки. Для корректной работы методики необходимо наличие достоверных координат точек наблюдения и устойчивой идентификации ориентиров на видеопоследовательности. Вместе с тем данные факторы имеют эксплуатационный характер и могут быть частично компенсированы за счет автоматизированного контроля качества наблюдений и накопления статистики, что соответствует современным направлениям развития систем технического зрения [2, 5, 7].

Заключение (Conclusion)

В работе решена задача определения географических координат береговых ориентиров по результатам угловых визуальных наблюдений, выполняемых с судна в процессе движения вдоль береговой черты. Предложенный подход ориентирован на формирование набора опорных ориентиров, предназначенных для последующего использования в системах визуального позиционирования судна в условиях резервирования спутниковых навигационных систем.

Разработана и экспериментально проверена методика определения координат ориентиров, основанная на использовании относительных углов визирования, получаемых по данным судовой видеосъемки. Показано, что отказ от прямого измерения абсолютных азимутов позволяет применять методику в условиях отсутствия высокоточного компаса, что расширяет область ее практического применения.

Сравнительный анализ плоской и сферической постановок задачи показал, что сферическая модель обеспечивает существенно более высокую точность и устойчивость решения при неблагоприятной геометрии наблюдений. Экспериментальные результаты подтверждают возможность определения координат береговых ориентиров с погрешностью порядка нескольких метров, что является достаточным для задач навигационного обеспечения в прибрежных и стесненных акваториях.

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования методов визуальной триангуляции, активно применяемых в современных системах визуальной навигации [1–3] для формирования цифровых моделей береговой черты. Предложенный подход может быть использован в качестве основы для разработки систем визуального позиционирования судна и, повышения устойчивости эргатической навигационной среды при отказах или деградации спутниковых навигационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Y. Image-based camera localization: an overview / Y. Wu, F. Tang, H. Li // *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*. — 2018. — Т. 1. — № 1. — С. 8. DOI: 10.1186/s42492-018-0008-z.
2. Li T. Accurate visual localization with semantic masking and attention / T. Li, Z. Zhan, G. Tan // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. — 2022. — Т. 2022. — № 1. — С. 42. DOI: 10.1186/s13634-022-00875-2.
3. Liang J. A Triangulation-Based Visual Localization for Field Robots / J. Liang, Y. Wang, Y. Chen, B. Yang, D. Liu // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. — 2022. — Vol. 9. — Is. 6. — Pp. 1083–1086. DOI: 10.1109/JAS.2022.105632.
4. Камаев А. Н. Визуальная навигация автономного необитаемого подводного аппарата с глобальным поиском связей между изображениями / А. Н. Камаев, Д. А. Карманов // *Компьютерная оптика*. — 2018. — Т. 42. — № 3. — С. 457–467. — EDN XTURZB. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-457-467.
5. Коновалов К. Д. Алгоритм планирования маршрута БПЛА в условиях недостатка визуальных ориентиров / К. Д. Коновалов // *Системы анализа и обработки данных*. — 2024. — № 2(94). — С. 37–54. — EDN JIAKXC. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-37-54.
6. Zhu S. Skyline matching: A robust registration method between Video and GIS / S. Zhu, M. Presigout, M. Servières, L. Morin, G. Moreau // *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models*. — 2012. — № 03007.
7. Штанько А. Н. Анализ дескрипторов для идентификации береговых средств навигационного оборудования в судовождении / А. Н. Штанько // *Навигация и гидрография*. — 2025. — № 2(79). — С. 19–29. — EDN PYBWIR.
8. Штанько А. Н. Интеграция методов навигации и компьютерного зрения для надежности идентификации средств навигационного оборудования / А. Н. Штанько // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2025. — № 3(116). — С. 22–25. — EDN LJZPXP.
9. Штанько А. Н. Определение некоторых навигационных параметров положения судна по цифровым изображениям / А. Н. Штанько // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2023. — № 3(108). — С. 205–208. DOI: — EDN VJHVPY. 10.34046/aumsuomt108/30.
10. Штанько А. Н. Обнаружение и опознавание средств навигационного оборудования в видеопотоке сверточной нейронной сетью для определения места судна / А. Н. Штанько, А. С. Васьков // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2024. — № 4(113). — С. 20–27. — EDN EIGZOU. DOI: 10.34046/aumsuomt113/3.

REFERENCES

1. Wu, Y., F. Tang and H. Li. “Image-based camera localization: an overview.” *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 1.1 (2018): 8. DOI: 10.1186/s42492-018-0008-z.
2. Li, T., Z. Zhan and G. Tan. “Accurate visual localization with semantic masking and attention.” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2022.1 (2022): 42. DOI: 10.1186/s13634-022-00875-2.
3. Liang, J., D. Liu et al. “A Triangulation-Based Visual Localization for Field Robots.” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 9.6 (2022): 1083–1086. DOI: 10.1109/JAS.2022.105632.
4. Kamaev, A. N. and D. A. Karmanov. “Visual navigation of an autonomous underwater vehicle based on the global search of image correspondences.” *Computer Optics* 42.3 (2018): 457–467. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-457-467.
5. Konovalov, K. D. “An algorithm for planning the uav route in conditions of a lack of visual landmarks.” *Analysis and Data Processing Systems* 2(94) (2024): 37–54. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-37-54.
6. Zhu, S., G. Moreau et al. “Skyline matching: A robust registration method between Video and GIS.” *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models* 03007 (2012).
7. Shtan'ko, A. N. “Analysis of descriptors for identification of coastal navigation equipment in navigation.” *Navigation and Hydrography* 2(79) (2025): 19–29.

8. Shtan'ko, A. N. "Integration of navigation methods and computer vision for reliable identification of navigation equipment." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(116) (2025): 22–25.

9. Shtan'ko, A. N. "Determination of some navigation parameters of the vessel's position from digital images." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(108) (2023): 205–208. DOI: 10.34046/aumsuomt108/30.

10. Shtan'ko, A. N. and A. S. Vas'kov. "Detection and identification of navigation equipment in the video stream by a convolutional neural network to determine the location of the vessel." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(113) (2024): 20–27. DOI: 10.34046/aumsuomt113/3.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Штанько Александр Николаевич —

кандидат технических наук

Воинская часть 84841

353440, Российская Федерация,

Краснодарский край, г. Анапа, ул. Трудящихся, 2в

e-mail: a.n.shtanko@internet.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shtanko, Aleksandr N. —

PhD in Technical Science

Military unit 84841, Anapa, Krasnodarskiy kray,

Russian Federation

2V Trudyashchikhsya Str, Anapa,

Krasnodarskiy kray, 353440, Russian Federation

e-mail: a.n.shtanko@internet.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2026 г.

Received: Jan 15, 2026

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ ПРОЦЕССА СНАБЖЕНИЯ ФЛОТА СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКОЙ НОТАЦИИ BPMN

Ю. В. Богословский, А. В. Кириченко

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

В работе выполнено описание процессов снабжения флота судоходной компании, сформулированы процедуры взаимодействия участников процесса поставки снабжения на судно, включая взаимодействие судового экипажа с офисом судоходной компании и последующей работы судоходной компании с агентскими и шипчандлерскими организациями. На основе текстового описания процессов построена графическая модель процессов поставки снабжения в форме нотации графического описания бизнес-процессов, отражающей взаимодействие участников процессов поставки. Цель статьи — на основе текстового описания процессов снабжения флота судоходной компании построить графическую процессную модель снабжения флота судоходной компании, позволяющую в дальнейшем использовать модель для анализа и совершенствования организации судового снабжения. Полученная модель позволяет наглядно представить структуру процесса и выявить ключевые точки взаимодействия между его участниками. Результаты работы могут быть использованы для анализа и дальнейшего совершенствования организации судового снабжения. Объектом исследования является процесс снабжения флота судоходной компании, предметом исследования — взаимодействие участников процесса поставки снабжения и последовательность выполняемых ими операций. В качестве основного метода исследования использован процессный подход, основанный на формализации действий, событий и информационных потоков между участниками процесса. Рассмотрены основные этапы процесса снабжения, начиная с формирования заявки экипажем судна и заканчивая доставкой и приемкой снабжения на борту судна. Построенная процессная модель в графической нотации BPMN позволяет выявить особенности межорганизационного взаимодействия, определить потенциальные точки возникновения задержек и оценить влияние взаимодействия участников на общую эффективность снабжения. Основные выводы статьи заключаются в том, что использование процессного моделирования создает основу для анализа и оптимизации процессов снабжения флота судоходной компании.

Ключевые слова: судовое снабжение, шипчандлер, процессная модель, процесс поставки снабжения, судоходная компания, графическая нотация, бизнес-процессы, взаимодействие участников поставки, логистика снабжения, временные ограничения.

Для цитирования:

Богословский Ю. В. Анализ взаимодействия участников процесса снабжения флота судоходной компании с использованием графической нотации BPMN / Ю. В. Богословский, А. В. Кириченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. — С. 261–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-261-271. — EDN JJCFRZ.

ANALYSIS OF INTERACTION OF PARTICIPANTS IN THE FLEET SUPPLY PROCESS OF A SHIPPING COMPANY USING BPMN GRAPHICAL NOTATION

Y. V. Bogoslovskiy, A. V. Kirichenko

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

The paper describes the fleet supply processes of a shipping company and formulates the procedures for interaction between participants in the process of delivering supplies to a vessel, including the interaction of the ship's crew with the company's office and the subsequent interaction of the shipping company with agency and ship chandler organizations. Based on the textual description of the processes, a graphical model of the supply process is constructed using BPMN graphical notation, reflecting the interaction between process participants. The purpose of the article is to develop a graphical process model of fleet supply of a shipping company based on a textual description of the processes, enabling its further use for analysis and improvement of ship supply organization. The resulting

model makes it possible to visualize the process structure and identify key points of interaction between participants. The results can be used for analysis and further improvement of ship supply organization. The object of the study is the fleet supply process of a shipping company, and the subject is the interaction between participants and the sequence of operations they perform. The main research method is a process approach based on the formalization of actions, events, and information flows between participants. The main stages of the supply process are considered, from the formation of a request by the ship's crew to the delivery and acceptance of supplies on board. The developed BPMN-based process model makes it possible to identify features of interorganizational interaction, determine potential delay points, and assess the impact of participant interaction on overall supply efficiency. The main conclusion is that the use of process modeling provides a basis for analysis and optimization of fleet supply processes of a shipping company.

Keywords: ship supply, ship chandler, process model, supply process, shipping company, BPMN, business processes, participant interaction, supply logistics, time constraints.

For citation:

Bogoslovskiy, Yuriy V. and A. V. Kirichenko. "Analysis of interaction of participants in the fleet supply process of a shipping company using BPMN graphical notation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 261–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-261-271.

Введение (Introduction)

Снабжение флота судоходной компании является сложным процессом [1], участниками которого являются судовой экипаж, офис судоходной компании, судовой агент, шипчандлер, производитель или поставщик продукции, таможенные органы. Наличие большого количества участников в условиях временных ограничений, накладываемых временем стоянки судна в порту, делает поставку судового снабжения рискованным и чувствительными к задержкам процессом. В таких условиях графическая нотация BPMN [2] может быть использована для анализа и оптимизации снабжения флота судоходной компании.

Управленческая концепция BPM (от англ. Business Process Management) рассматривает бизнес-процессы как важные ресурсы компании или предприятия [3] и предполагает управление ими в качестве одной из ключевых организационных систем [4]. Согласно научным статьям ряда авторов [5], BPM концепция предполагает значительную оптимизацию и повышение производительности при одновременном снижении затрат [6]. В философии BPM концепция процесса используется в качестве отправной точки для понимания того, как работает бизнес и какие существуют решения для улучшения составляющих его видов деятельности [7].

Процессно-ориентированный подход к повышению производительности позволяет использовать современные информационные технологии [8] для анализа существующих бизнес-процессов и последующего обеспечения их эффективности и прозрачности, поэтому использование процессного подхода имеет как управленческие [9], так и технические выгоды [10]. Процессный подход также активно применяется в отечественной научной среде в сфере морской транспортной логистики [11, 12].

Целью настоящей статьи является систематизация и формализация процесса снабжения флота судоходной компании на примере поставки снабжения на морское торговое судно, а также построение на основе текстового описания [13] графической процессной модели в нотации BPMN, отражающей взаимодействие основных участников процесса и позволяющей в дальнейшем использовать ее для анализа [14] и совершенствования организации судового снабжения. Для достижения поставленной цели в статье предполагается решить следующие задачи: рассмотреть процесс снабжения морского торгового судна как комплексное взаимодействие участников поставки, включающее работу судового экипажа, офиса судоходной компании, судового агента, шипчандлерской компании, поставщиков продукции и таможенных органов, составить подробное текстовое описание процесса снабжения, отражающее последовательность их действий и взаимодействий, а также на основе подготовленного текстового описания разработать графическую процессную модель снабжения флота в нотации BPMN с учетом распределения функций и взаимодействия между участниками процесса.

Методы и материалы (Methods and Materials):

В качестве метода используется процессный подход, для моделирования бизнес-процессов — графическая нотация BPMN. В качестве материалов для составления графической BPMN модели приводится текстовое описание процессов поставки снабжения на морское торговое судно и процессов взаимодействия участников такой поставки.

На основе текстового описания взаимодействия участников процесса комплексного снабжения флота судоходной компании создана графическая BPMN модель процессов поставки судового снабжения на борт судна.

Использование единой нотации описания бизнес-процессов создает условия для унификации представления данных и облегчает дальнейший анализ. Это особенно важно в условиях изменяющейся внешней среды, когда процессы снабжения могут модифицироваться в зависимости от логистических ограничений, доступности поставщиков и организационных решений. В таких условиях процессная модель выступает не только инструментом описания, но и основой для последующей оптимизации, позволяя выявлять избыточные операции, сокращать время выполнения отдельных этапов и повышать согласованность действий участников процесса.

Результаты (Results)

Приведем текстовое описание процесса поставки снабжения на морское судно. Процедура организации судового снабжения инициируется силами экипажа, который анализирует текущие потребности и формирует соответствующую заявку на снабжение. Как правило, от палубной команды заявку направляет старший помощник капитана, а от машинной команды — старший механик. Для стандартизации процесса применяются отраслевые каталоги, такие как издаваемый Международной ассоциацией судовых поставщиков (ISSA) каталог с семизначными кодами позиций или каталог IMPA с шестизначными кодами [10]. Использование унифицированных кодов облегчает экипажу процедуру заказа, а судоходным компаниям, судовым агентам и шипчандлерским организациям — обработку запросов. Существуют и специализированные каталоги, ориентированные на узкие категории товаров, например KERGER (электротехнические изделия) или каталоги запасных частей от производителей. Передача заявки осуществляется либо по электронной почте, либо через корпоративные системы управления судами, такие как PMS (Planned Maintenance System) или SAP.

На стороне судоходной компании за каждым судном, обычно за группой судов, закреплен суперинтендант, в обязанности которого входит контроль бюджета, выделенного на техническое снабжение. При этом статьи расходов на провизию и заработную плату экипажа, как правило, курируются отдельно. Получив заявку, суперинтендант проводит ее анализ и утверждает полностью или частично. Для экипажа критически важно маркировать срочные запросы (например, на запасные части), убедившись в том, что запрос принят в работу. После утверждения заявка передается в отдел снабжения судоходной компании. Далее отдел снабжения выбирает один из двух основных вариантов действий: либо самостоятельно запрашивает коммерческие предложения (RFQ — request for quotation) у нескольких поставщиков или шипчандлерских организаций, выбирая оптимальное по цене и срокам, либо поручает организацию поставки агенту в порту захода. В последнем случае агент самостоятельно взаимодействует с шипчандлерской компанией.

Структура шипчандлерских компаний варьируется в зависимости от размера компании и региона. Крупные международные порты часто обслуживаются компаниями с широкой специализацией, собственными складами и логистическими службами. В то же время в некоторых небольших российских портах шипчандлерские компании могут состоять из нескольких сотрудников (например, директора, совмещающего функции менеджера по закупкам, и бухгалтера) и работать по посреднической модели без собственных складских запасов. В этом случае после получения запроса шипчандлер запрашивает цены у поставщиков, формирует сводное коммерческое предложение (нередко в виде счёта из системы IC) с учетом собственной наценки и направляет его в отдел снабжения судоходной компании для подтверждения всей заявки или отдельных позиций. После подтверждения шипчандлер осуществляет закупку, консолидирует товары в единую поставку и организует доставку на борт в согласованное время (согласование обычно ведется с агентом или отделом снабжения).

Поставка сопровождается товарной накладной, подписываемой при приемке. В случае если для доставки снабжения на борт используется сторонний транспорт, требуется таможенное декларирование. В случае, когда судоходная компания использует собственный транспорт, декларация не оформляется, бывает достаточно составления уведомительного письма в таможенные органы. Для таможенного оформления необходимы заказ на закупку, инвойс и рамочный контракт либо разовый инвойс-контракт. После выпуска декларации оформляется пропуск на въезд транспорта в порт, и поставка осуществляется в согласованный срок. Следует отметить, что при большом количестве позиций в декларации возможны задержки ее выпуска таможенными органами.

На основе текстового описания составим графическую BPMN модель процессов поставки снабжения на морское торговое судно и взаимодействия участников такой поставки. Ввиду объема полученной процессной модели приведем полную BPMN модель поставки снабжения на борт морского судна с разбивкой по листам (рис. 1).

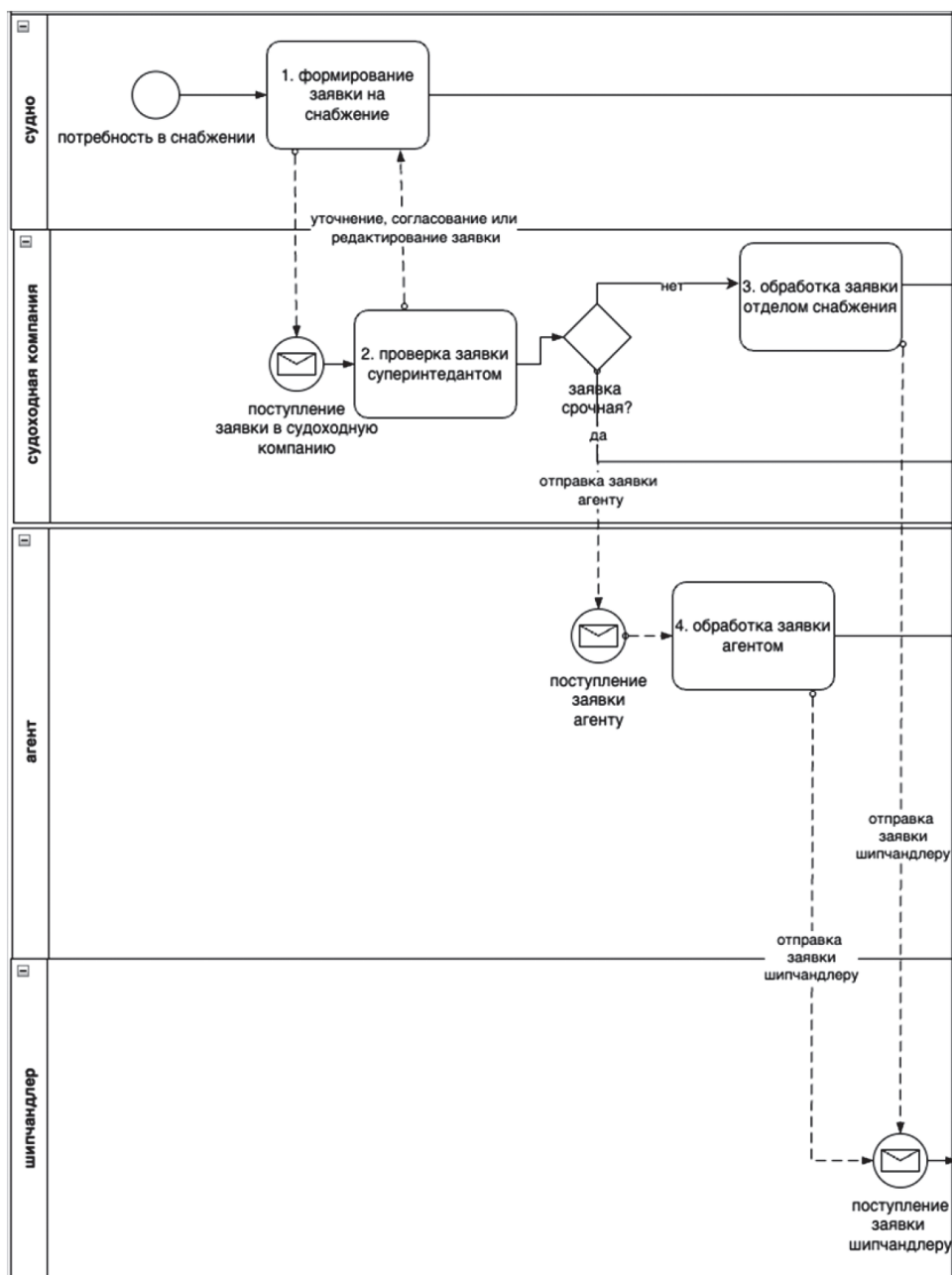


Рис. 1. (Начало). BPMN модель процессов поставки снабжения на морское торговое судно и взаимодействия участников такой поставки (лист 1)
Fig. 1. (beginning). BPMN model of supply delivery processes to a seagoing merchant vessel and interaction of participants in such delivery (sheet 1)

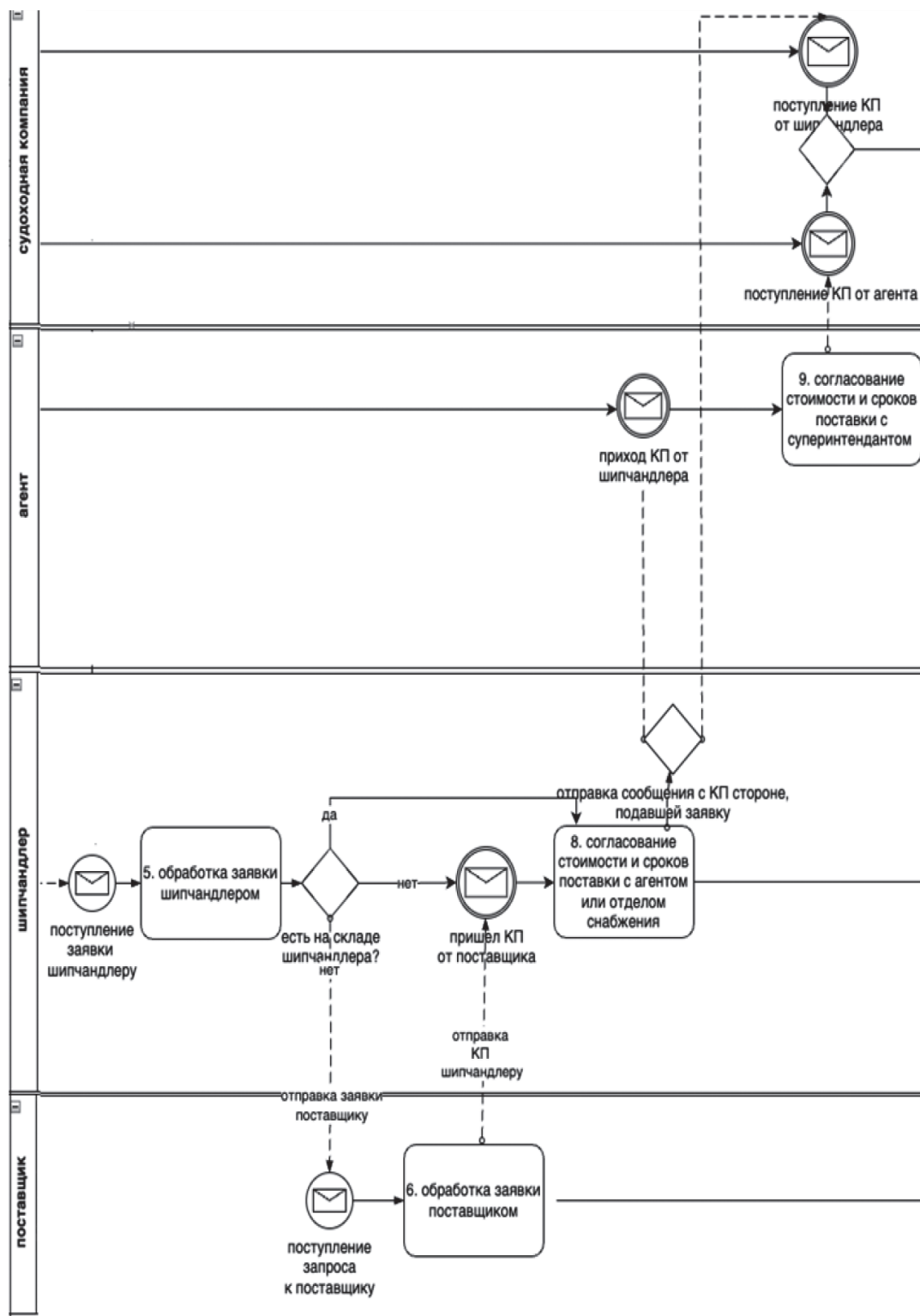


Рис. 1. (Продолжение). BPMN модель процессов поставки снабжения на морское торговое судно и взаимодействия участников такой поставки (лист 2)
Fig. 1. (continuation). BPMN model of supply delivery processes to a seagoing merchant vessel and interaction of participants in such delivery (sheet 2)

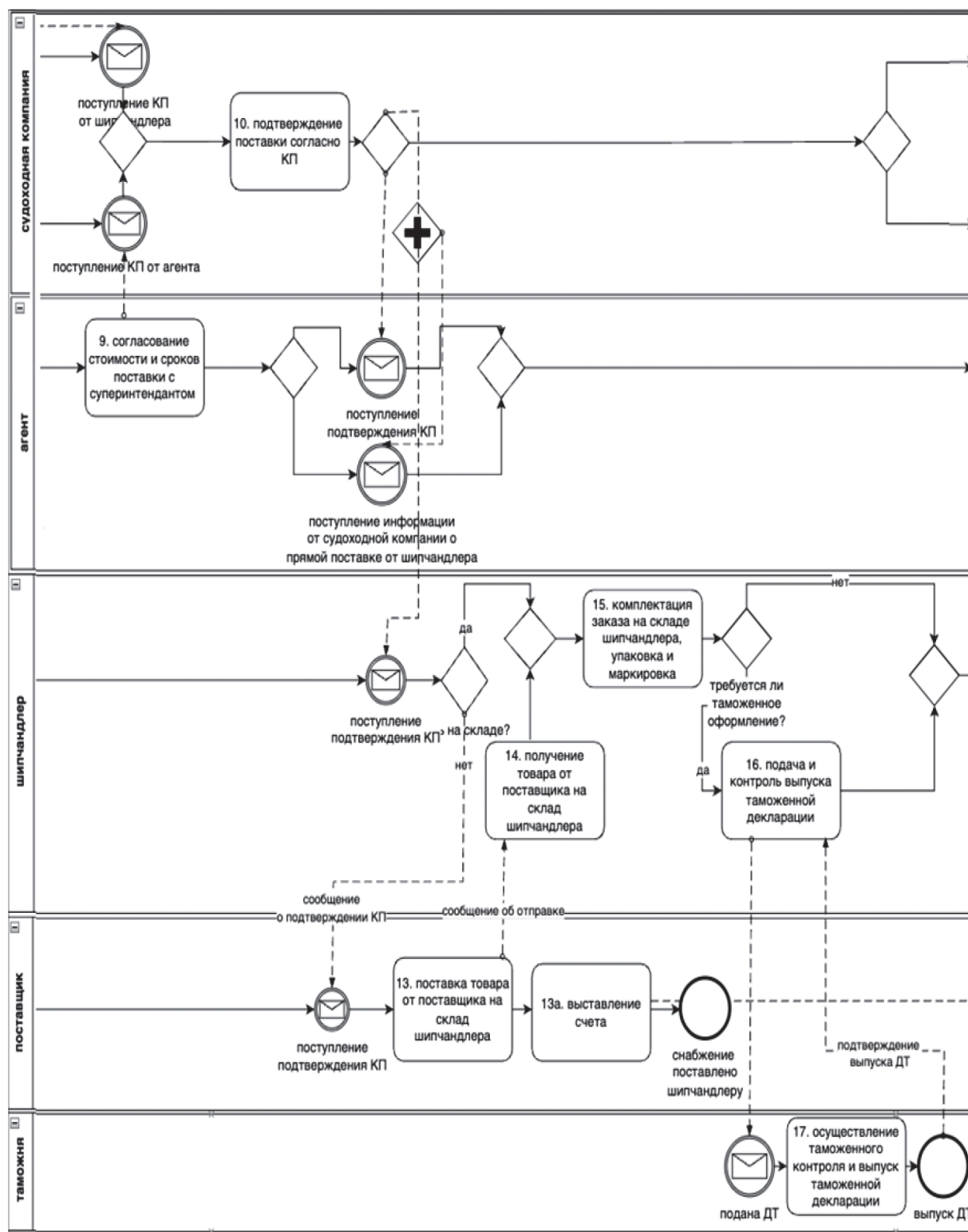


Рис. 1. (Продолжение). BPMN модель процессов поставки снабжения на морское торговое судно и взаимодействия участников такой поставки (лист 3)
Fig. 1. (continuation). BPMN model of supply delivery processes to a seagoing merchant vessel and interaction of participants in such delivery (sheet 3)

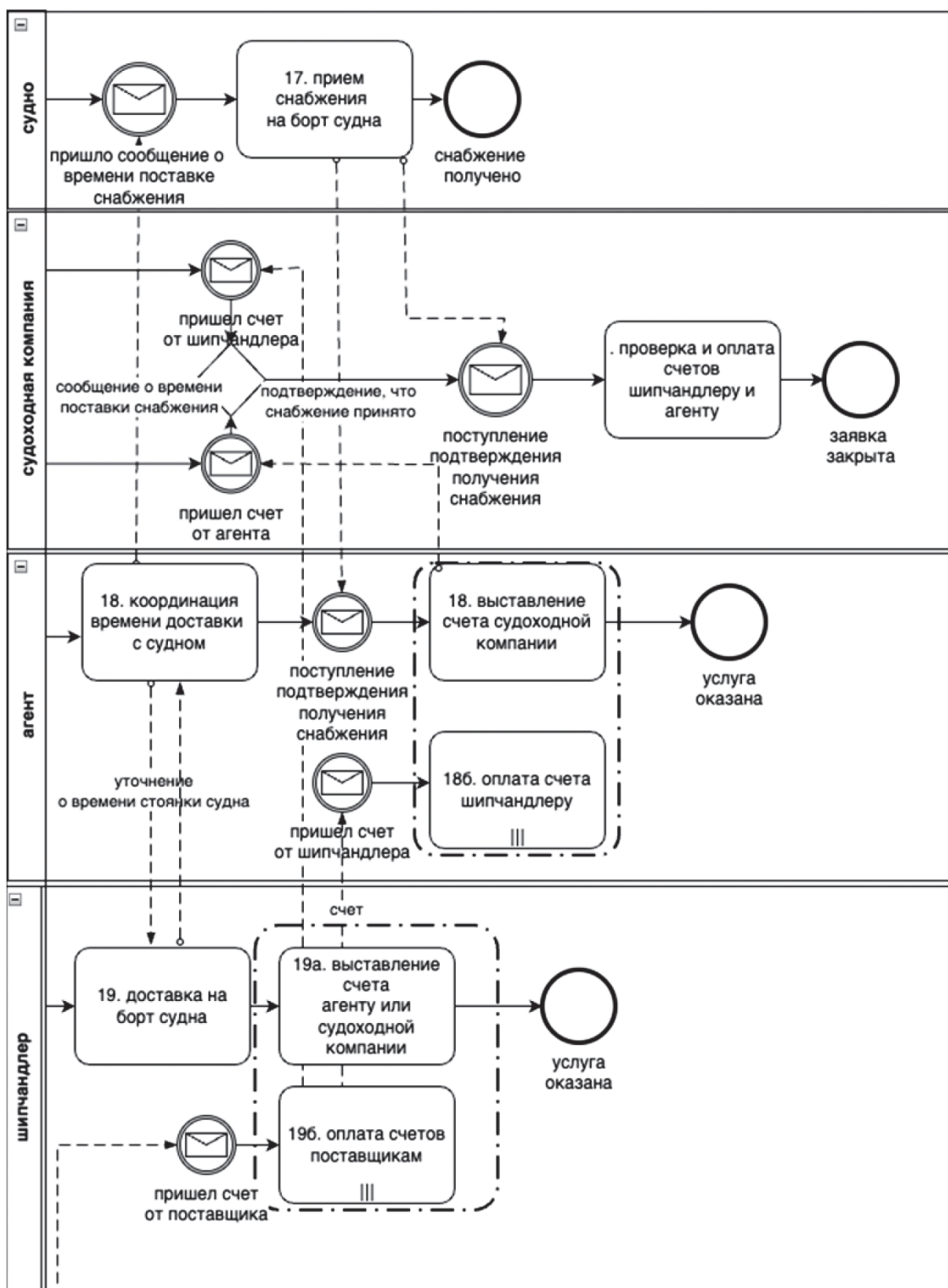


Рис. 1. (Окончание). BPMN модель процессов поставки снабжения на морское торговое судно и взаимодействия участников такой поставки (лист 4)
Fig. 1. (ending). BPMN model of supply delivery processes to a seagoing merchant vessel and interaction of participants in such delivery (sheet 4)

Условные обозначения пиктограмм и элементов, использованных в графической BPMN модели приведены на рис. 2.

	действие или операция, которую надо выполнить		начальное событие (иницирующее бизнес-процесс)
	действие, выполняемое параллельно с основным действием		начальное событие-сообщение
	шлюз исключающего = развилка («или»)		промежуточное событие-сообщение
	шлюз параллельный		завершающее событие
	поток управления		
	поток сообщений		
	группа объектов		

Рис. 2. Условные обозначения пиктограмм и элементов, использованных в графической BPMN модели

Fig. 2. Legend of symbols and elements used in the BPMN graphical model

Таким образом, результаты моделирования позволили формализовать процесс снабжения и структурировать взаимодействие его участников. Выявленные этапы и взаимосвязи создают основу для анализа временных и организационных характеристик процесса. Построенная модель может быть использована для дальнейшего совершенствования системы снабжения флота судоходной компании.

Обсуждение (Discussion)

Составленная в графической нотации BPMN процессная модель позволяет наглядно увидеть взаимодействие участников процесса поставки снабжения флота судоходной компании на примере поставки на отдельно взятое морское судно. Модель показывает сложность процесса поставки, включающего как внутренние взаимодействия: *экипаж судна — офис компании*, так и внешние: *судоходная компания — судовой агент — шипчандлерская компания — таможенные органы*. Выделение событий, задач и потоков сообщений в нотации BPMN может помочь идентифицировать потенциальные точки возникновения задержек [15], включая этап согласования заявки суперинтендантом, сбор коммерческих предложений или процедуру таможенного оформления.

Особую ценность модель представляет для анализа вариантов процесса (например, поставка через агента или напрямую), что соответствует реальной практике работы судоходных компаний в разных портах. Так как в доступных источниках не было найдено моделей BPMN, отражающих процесс поставки снабжения на морское торговое судно, сравнить данную модель с моделями других авторов на текущий момент не представляется возможным, что подчеркивает новизну проведенной работы.

Заключение (Conclusion)

В статье приведено текстовое описание процессов поставки снабжения на морское торговое судно и описание взаимодействия участников таких процессов. На основе текстового описания составлена графическая процессная модель в нотации BPMN, которая открывает возможности для дальнейшего анализа и оптимизации взаимодействия участников. Также для каждого участника процесса поставки приведены отдельные «дорожки» процессов в графической нотации BPMN. Модель визуализирует логику процесса и информационные потоки, что является важным шагом для формализации и последующего совершенствования логистики судового снабжения.

Модель открывает возможности для дальнейшего анализа и оптимизации взаимодействия участников процесса поставки снабжения. В перспективе на основе данной модели возможно применение инструментов сетевого планирования и имитационного моделирования для оценки и оптимизации общей продолжительности процесса поставки снабжения на борт морского судна.

Результаты работы могут быть использованы судоходными компаниями для оценки и реинжиниринга процессов снабжения, разработки регламентирующей документации, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов в области морской логистики и управления флотом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ramos Gutiérrez B.* When business processes meet complex events in logistics: A systematic mapping study / B. Ramos Gutiérrez, A. M. Reina Quintero, L. Parody, M. T. Gómez López // *Computers in Industry*. — 2023. — Vol. 144. — Pp. 103788. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103788.
2. *Sholiq S.* BPMN diagram dataset: Comprehensive collection of functional requirements / S. Sholiq, M. A. Yaqin // *Data in Brief*. — 2024. — Vol. 57. — Pp. 110882. DOI: 10.1016/j.dib.2024.110882.
3. *Дмитриенко Д. В.* Исследование операций — инструмент для повышения эффективности управления водным транспортом / Д. В. Дмитриенко // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1131–1141. — EDN ZSRYHD. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
4. *Reijers H. A.* Business Process Management: The evolution of a discipline / H. A. Reijers // *Computers in Industry*. — 2021. — Vol. 126. — Pp. 103404. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103404.
5. *Weinzierl S.* Machine learning in business process management: A systematic literature review / S. Weinzierl, S. Zilker, S. Dunzer, M. Matzner // *Expert Systems with Applications*. — 2024. — Vol. 253. — Pp. 124181. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124181.
6. *Dumitriu D.* Research on the trend and potential impact of adopting BPM techniques over general performance of the organization / D. Dumitriu // *Procedia Manufacturing*. — 2018. — Vol. 22. — Pp. 575–582. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.084.
7. *Nurmadewi D.* Analyzing Linkage Between Business Process Management (BPM) Capability and Information Technology: A Case Study in Garment SMEs / D. Nurmadewi, M. ER // *Procedia Computer Science*. — 2019. — Vol. 161. — Pp. 935–942. DOI: 10.1016/j.procs.2019.11.202.
8. *Кузнецов А. Л.* Подход к моделированию контейнерных терминалов на основе бизнес-процессов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1039–1050. — EDN OIQJZS. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1039-1050.
9. *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. — EDN SBKQUN. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.
10. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование сетевых технологических процессов грузообработки в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 526–536. — EDN NBJCHK. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-526-536.
11. *Кузнецов А. Л.* Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. — EDN TNLNKM. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

12. The Association for Cleaning & Facility Solutions. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: issa.com (дата обращения: 24.11.2025).
13. Sholiq S. Generating BPMN diagram from textual requirements / S. Sholiq, R. Sarno, E. S. Astuti // *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*. — 2022. — Vol. 34. — Is. 10, Part B. — Pp. 10079–10093. DOI: 10.1016/j.jksuci.2022.10.007.
14. Licardo J. T. A Method for Extracting BPMN Models from Textual Descriptions Using Natural Language Processing / J. T. Licardo, N. Tanković, D. Etinger // *Procedia Computer Science*. — 2024. — Vol. 239. — Pp. 483–490. DOI: 10.1016/j.procs.2024.06.196.
15. Cimino A. Evolution of BPMN and Simulation Integration: Trends, Challenges, and Future Directions / A. Cimino, A. C. Filice, F. Longo, G. Mirabelli, V. Solina, S. Mallek-Daclin, N. Daclin, G. Zacharewicz // *Procedia Computer Science*. — 2025. — Vol. 253. — Pp. 3235–3246. DOI: 10.1016/j.procs.2025.02.048.

REFERENCES

1. B. Ramos Gutiérrez, A. M. Reina Quintero, L. Parody and M. T. Gómez López. “When business processes meet complex events in logistics: A systematic mapping study.” *Computers in Industry* 144 (2023): 103788. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103788.
2. Sholiq, S. and M. A. Yaqin. “BPMN diagram dataset: Comprehensive collection of functional requirements.” *Data in Brief* 57 (2024): 110882. DOI: 10.1016/j.dib.2024.110882.
3. Dmitrienko, D. V. “Operations research — a tool to improve the efficiency of management of water transport.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1131–1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
4. Reijers, H. A. “Business Process Management: The evolution of a discipline.” *Computers in Industry* 126 (2021): 103404. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103404.
5. Weinzierl, S., S. Zilker, S. Dunzer and M. Matzner. “Machine learning in business process management: A systematic literature review.” *Expert Systems with Applications* 253 (2024): 124181. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124181.
6. Dumitriu, D. “Research on the trend and potential impact of adopting BPM techniques over general performance of the organization.” *Procedia Manufacturing* 22 (2018): 575–582. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.084.
7. Nurmawati, D. and M. ER. “Analyzing Linkage Between Business Process Management (BPM) Capability and Information Technology: A Case Study in Garment SMEs.” *Procedia Computer Science* 161 (2019): 935–942. DOI: 10.1016/j.procs.2019.11.202.
8. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Approach to container terminal simulation modelling based on business processes.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1039–1050. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1039-1050.
9. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and R. V. Kuznetsov. “Mathematical description of the sea ports throughput assessment.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.
10. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Simulation modelling for network technological processes of seaports cargo handling.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 526–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-526-536.
11. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.
12. The Association for Cleaning & Facility Solutions. Web. November 24, 2025 < issa.com >.
13. Sholiq, S., R. Sarno and E. S. Astuti. “Generating BPMN diagram from textual requirements.” *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences* 34.10, Part B (2022): 10079–10093. DOI: 10.1016/j.jksuci.2022.10.007.
14. Licardo, J. T., N. Tanković and D. Etinger. “A Method for Extracting BPMN Models from Textual Descriptions Using Natural Language Processing.” *Procedia Computer Science* 239 (2024): 483–490. DOI: 10.1016/j.procs.2024.06.196.
15. Cimino, A., G. Zacharewicz et al. “Evolution of BPMN and Simulation Integration: Trends, Challenges, and Future Directions.” *Procedia Computer Science* 253 (2025): 3235–3246. DOI: 10.1016/j.procs.2025.02.048.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Богословский Юрий Вадимович — аспирант
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yury.bogoslovsky@mail.ru
Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bogoslovskiy Yuriy V. — postgraduate student
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yury.bogoslovsky@mail.ru
Kirichenko Aleksandr V. —
Grand PhD in Technical Science, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 13 января 2025 г.
Received: Jan. 13, 2025.*

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫМ СУДНОМ
ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ В СЛОЖНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ****П. А. Гарибин¹, С. А. Кабанов²**¹ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация² ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе предложен алгоритм управления движением и прохождением безэкипажного судна навигационных опасностей в соответствии с Правилами плавания судов по внутренним водным путям Российской Федерации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и эффективности движенических операций за счет внедрения автономных технологий при наличии на борту судна точной (без ошибок) информации о текущей ситуации. Управление осуществляется непосредственно на борту безэкипажного судна, т. е. автономно, а не по командам с берега. Задача оптимального управления решается для упрощенной модели центра масс подвижного объекта. Отмечается, что наличие необходимости принятия решения по управлению судном в реальном времени приводит к использованию как математических моделей, так и модели информационной. Продуктивным является применение самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией А. А. Красовского. В работе весовые коэффициенты ПИД-регулятора определяются из аналитических выражений, полученных для самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией. Предложены математические модели и алгоритмы для анализа навигационной обстановки и корректировки маршрута, а также рассмотрены методы интеграции данных. Сформирована математическая модель динамики, а также установлены алгоритмы оптимального управления, обеспечивающие безопасность безэкипажного судна. Разработана методология возможности маневрирования безэкипажного судна посредством автономного оптимального ситуационного управления с обходом зон навигационной опасности движения. Представлены результаты компьютерного моделирования динамики оптимального движения судна.

Ключевые слова: водоизмещающее судно, перекасты, управление движением, регулятор, реальное время, прогнозирующие модели, водные пути, автономность управления, компьютерное моделирование, оптимизация.

Для цитирования:

Гарибин П. А. Синтез оптимального управления безэкипажным судном при маневрировании в сложных навигационных условиях / П. А. Гарибин, С. А. Кабанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 272–283. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-272-283. — EDN KCHCNG.

**SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROL FOR AN UNMANNED VESSEL
DURING MANEUVERING IN COMPLEX NAVIGATIONAL CONDITIONS****P. A. Garibin¹, S. A. Kabanov²**¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation² Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper proposes an algorithm for controlling the motion of an unmanned vessel and for navigating through navigational hazards in accordance with the Rules for Navigation on Inland Waterways of the Russian Federation. The relevance of the study is обусловлена the need to ensure the safety and efficiency of vessel operations through the implementation of autonomous technologies under the condition of availability of accurate onboard information about the current situation. Control is performed directly on board the unmanned vessel, i. e., autonomously, rather

than based on commands from the shore. The optimal control problem is solved for a simplified center-of-mass model of a moving object. It is noted that the requirement to make real-time decisions in vessel control leads to the use of both mathematical and information models. The application of A. A. Krasovsky's self-organizing optimal regulator with extrapolation is effective. In this work, the weighting coefficients of the PID controller are determined from analytical expressions obtained for the self-organizing optimal regulator with extrapolation. Mathematical models and algorithms are proposed for the analysis of the navigational situation, route correction, and data integration. A mathematical model of dynamics is developed, and optimal control algorithms ensuring the safety of the unmanned vessel are established. A methodology for maneuvering an unmanned vessel based on autonomous optimal situational control with avoidance of navigation hazard zones is developed. The results of computer simulation of optimal vessel motion are presented.

Keywords: displacement vessel, shoals, motion control, controller, real-time, predictive models, inland waterways, autonomous control, computer simulation, optimization.

For citation:

Garibin, Pavel A. and S. A. Kabanov. "Synthesis of optimal control for an unmanned vessel during maneuvering in complex navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 272–283. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-272-283.

Введение (Introduction)

Проблемам управления движением надводных судов посвящено большое число исследований. Так, например, в работах [1, 2] предложен синтез адаптивного управления роботизированным судном в условиях неопределенности. Работа [3] посвящена стабилизации оптимального управления автоматическим подводным аппаратом на траектории, формируемой по алгоритму с коррекцией структуры управления, полученной на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина.

Нелинейный характер гидродинамических сил и моментов, связанных с динамикой судна, наличие внешних возмущений, а также изменяющиеся условия окружающей среды затрудняют построение имитационной модели движения. В работе рассматривается динамика судна в сечении по ватерлинии. Оптимальная траектория движения формируется на основе уравнений динамики центра масс судна, исходя из минимизации целевого функционала, в подынтегральную часть которого входит штрафная функция для учета возникающих ограничений на траекторию. Для стабилизации судна на оптимальной траектории его центра масс угол закладки рулей вычисляется через кривизну траектории с привлечением самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ) А. А. Красовского [4].

На реках и искусственных каналах актуальным является вопрос о вынужденном маневрировании судов, особенно безэкипажных, при прохождении ими участков навигационных опасностей движения (например, перекаты, участки искусственных каналов и др.). В природе существуют наносы и движение песчаных гряд в дноуглубительных прорезях между перекатами. Раз в 5 лет по существующим прорезям выполняют эксплуатационные землечерпательные работы [5]. В настоящее время имеют место случаи маловодности судоходных рек с труднопрогнозируемым изменением рельефа дна. Все эти факторы усугубляют навигационную опасность движения судов.

Наносы в реке часто располагаются по направлению их перемещения, образуя косой поперечный вал в русле, который своим мелководьем затрудняет судоходство тем, что создает перекаты (рис. 1). Между перекатами находятся глубоководные участки реки — плесы. Степень сложности судождения по перекатам зависит от их свойств. Перекаты весьма разнообразны, они отличаются друг от друга расположением в русле, элементами в плане и профиле, а также гидрологическим режимом [5, 6].

Навигационные и проектные глубины канала зависят от принятого порядка движения судов, главных размерений расчетного судна, параметров внешних воздействий (ветер, течение, волнение), а также от габаритов прорези канала (рис. 2).

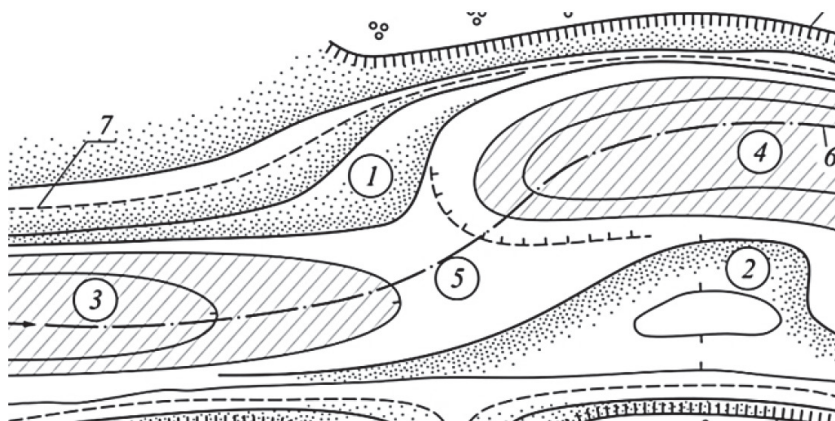


Рис. 1. План переката: 1 — верхний побочень; 2 — нижний побочень;
3 — верхняя плесовая лощина; 4 — нижняя плесовая лощина; 5 — корыто переката;
6 — ось судового хода; 7 — урез воды

Fig. 1. Shoal plan: 1 — upstream shoal margin; 2 — downstream shoal margin;
3 — upstream pool hollow; 4 — downstream pool hollow; 5 — shoal trough;
6 — fairway axis; 7 — water edge

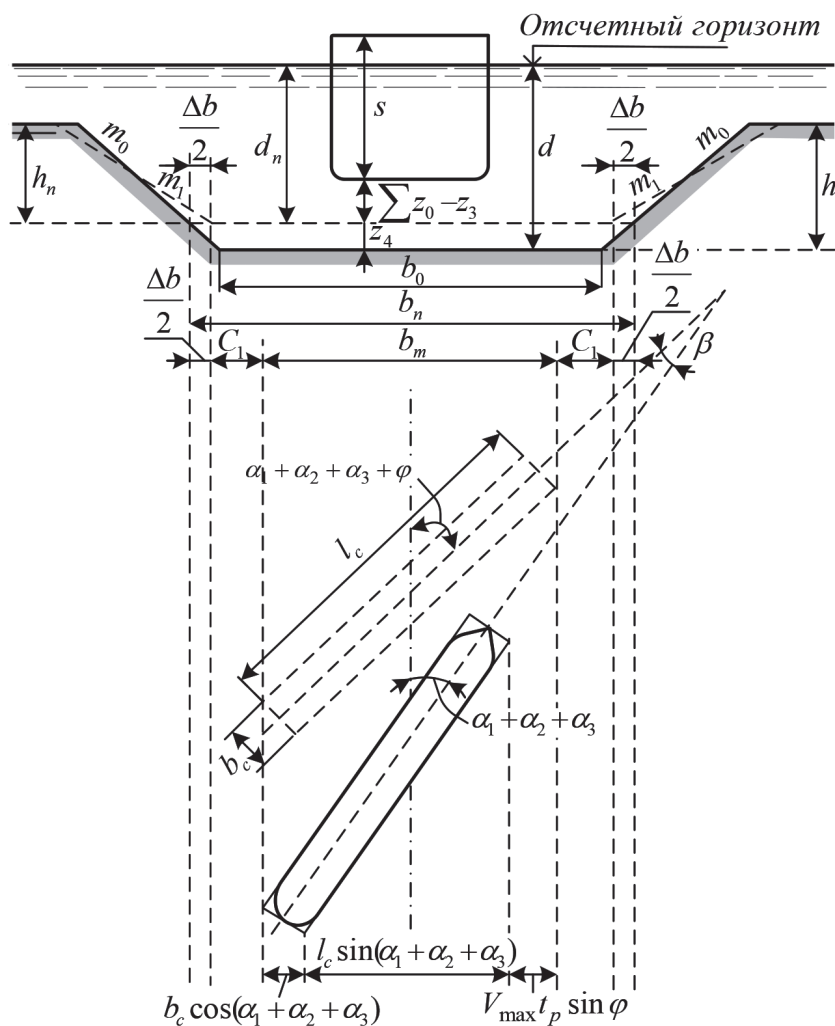


Рис. 2. Схема положения судна на прорези канала
при определении ее габаритных размеров

Fig. 2. Diagram of vessel position in the channel cut
when determining its overall dimensions

Ширина маневровой полосы b_m для расчетного судна определяется из выражения [2]:

$$b_m = l_c \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + b_c \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + t_p \sin \varphi V_{\max}, \quad (1)$$

где α_1 — угол сноса судна от течения, град.; α_2 — угол дрейфа судна от ветра, град.; α_3 — угол сноса судна от волнения, град.; l_c и b_c — длина и ширина расчетного судна, м; t_p — время рыскания судна, с; φ — угол рыскания судна, град.

На практике величина $t_p \sin \varphi$ принимается постоянной и равной 3 с; $V_{\max}$ — максимальная скорость хода судна, м/с. Канал проектируется таким образом, чтобы суммарный угол сноса $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ не превышал 25° . В противном случае считается, что судно теряет управляемость.

Ширина полосы канала $b_{пк}$, занимаемая судном на циркуляции, находится по наиболее удаленной точке A_1 и точке D_1 , которая при малых углах дрейфа находится на борту судна (рис. 3, а), а при больших — на носовой оконечности судна (рис. 3, б).

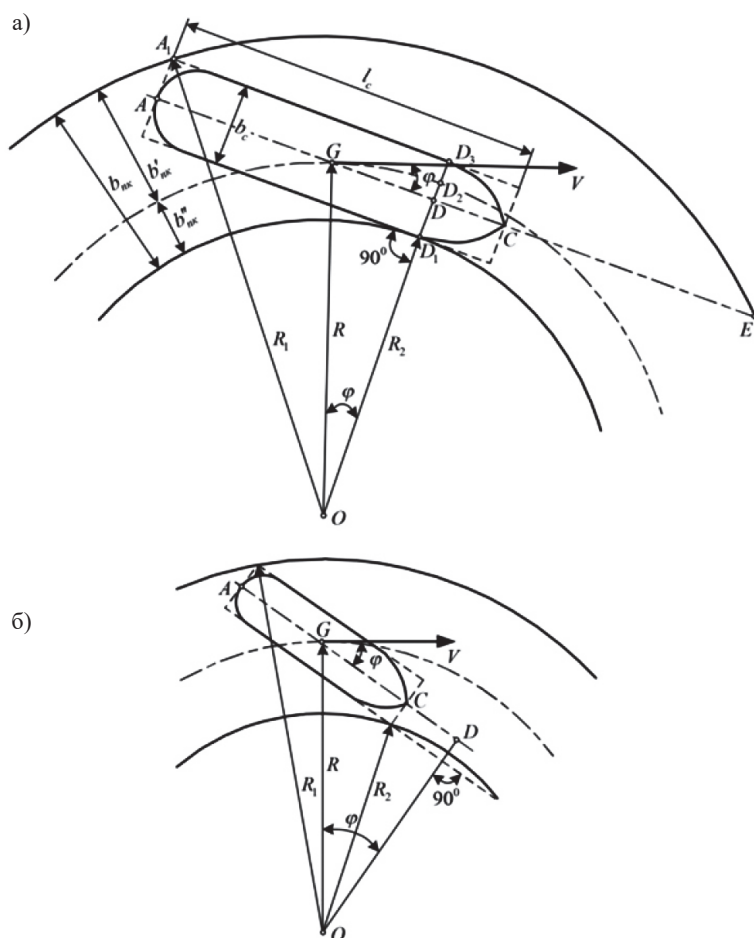


Рис. 3. Расчетные схемы для определения уширения на криволинейных участках канала полного профиля:
а — при малом угле дрейфа; б — при большом угле дрейфа
Fig. 3. Calculation schemes for determining channel widening on curved sections of a full-profile channel:
(a) at small drift angle; (b) at large drift angle

Предложенный в статье алгоритм основан на возможности оперативного оптимального управления судном с учетом в зависимости от внешних условий маневра путем использования прогнозирующих моделей движения центра масс судна. Стабилизация судна на выбранной траектории производится с использованием ПИД-регулятора, являющегося частным случаем СОРЭ. Управление осуществляется поворотом рулей направления для обеспечения минимума боковых отклонений судна от оптимальной траектории.

Представлены результаты компьютерного моделирования оптимального движения судна. Для судов представленный алгоритм реализован впервые. Работа имеет непосредственное практическое значение при посадках судов с экипажами на мель.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследована задача оптимального обхода безэкипажным судном препятствия в виде переката. В качестве целевого функционала рассмотрен критерий, в терминальную часть которого входят координаты конечной точки движения, в интегральную — функция штрафа за нарушение зоны навигационной опасности и затраты на управление. Использование функционала Красовского приводит к алгоритму с прогнозирующей моделью, реализуемого в реальном времени в темпе движения.

В качестве имитационной модели динамики судна рассмотрена следующая упрощенная система дифференциальных уравнений судна как твердого тела [7], без учета движений дифферента и крена:

$$\begin{aligned}\dot{V}_x &= \frac{1}{m_x} (R_x - m_z \omega_y V_z); \\ \dot{V}_z &= \frac{1}{m_z} (R_z + m_x \omega_y V_x); \\ \dot{\omega}_y &= \frac{1}{J_y} [M_y - V_x V_z (m_x - m_z)]; \\ \dot{\phi} &= \omega_y; \\ \dot{x}_g &= V_{xg} = V, \quad \dot{z}_g = V_{zg} = -V(\phi - \beta),\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь $V_g = [V_{xg} \ V_{zg}]^T$ — вектор скорости с проекциями на оси базовой системы координат (СК), $V = [V_x \ V_z]^T$ — вектор скорости с проекциями на оси связанной СК, $V = B_v V_g$ или $V_g = B_v^{-1} V$; B_v , B_v^{-1} — соответственно прямая и обратная матрицы перехода из базовой в связанную СК и наоборот:

$$B_v^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где ϕ — угол рыскания; $\beta = \arcsin \frac{V_z}{V}$ — угол дрейфа.

Приняты следующие допущения:

- линейная и угловая скорости движения определяются в связанной СК, начало которой совмещено с полюсом объекта (центром масс судна $x = z = 0$).
- корпус судна принимается подобным эллипсоиду вращения (координатные оси являются главными центральными осями инерции), $J_{xz} = 0$.
- матрица инерции судна D и матрица присоединенной массы жидкости Λ считаются диагональными.

Элементы Λ рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}& \text{– присоединенные массы } \lambda_{11} = k_{11} \rho v, \quad \lambda_{22} \approx \lambda_{33} = k_{22} \rho v; \\ & \text{– присоединенные моменты инерции } \lambda_{44} = k_{44} J_{xx}, \quad \lambda_{55} = \lambda_{66} = k_{66} J_{yy},\end{aligned}\quad (4)$$

где ρ — массовая плотность жидкости; v — объемное водоизмещение судна; k_{ii} — безразмерные коэффициенты, которые зависят от соотношения геометрических размеров судна и изменяются в пределах $k_{11} = 0,02 - 0,5$, а остальные — от 0 до 1,0 (при этом масса вытесненной жидкости в стационарных условиях движения совпадает с массой самого водоизмещающего судна: $\rho v = m$).

В данном случае суммарная матрица инерции $D + \Lambda$ является диагональной, а ее элементы имеют вид:

$$m_x = (1 + k_{11})m; m_z = (1 + k_{22})m; J_y = (1 + k_{66})J_{yy}. \quad (5)$$

Проекции главного вектора и главного момента гидродинамических сил на оси связанной СК имеют вид:

$$R_x = R - 0,5\rho V_r^2 S c_x; R_z = 0,5\rho V_r^2 S c_z; M_y = 0,5\rho V_r^2 S L m_y^0, \quad (6)$$

где $q = 0,5\rho V_r^2$ — скоростной напор; V_r — скорость потока жидкости, обтекающей корпус судна; S, L — соответственно характерные площадь и длина плавучего объекта; R — тяга двигателя; $c_x = c_{x0} + c_x^{\beta^2}\beta^2$ — безразмерный коэффициент гидродинамической силы сопротивления; $c_z = c_z^{\beta}\beta + c_z^{\delta}\delta$ — безразмерный коэффициент поперечной гидродинамической силы; $m_y^0 = m_y^{\beta}\beta + m_y^{\delta}\delta$ — безразмерный коэффициент гидродинамического момента рыскания.

Таким образом, представлена имитационная модель судна, динамика которого оптимизирована в следующем разделе статьи.

Результаты (Results)

Рассмотрим уравнения движения центра масс судна в горизонтальной плоскости, записанные через кривизну траектории K [3, 8]:

$$\dot{\varphi} = vK; \dot{x} = v\cos\varphi; \dot{z} = -v\sin\varphi; \dot{v} = agn_x; \dot{K} = u_1, \quad (7)$$

где $X = (\varphi \ x \ z \ v \ K)^T$ — вектор состояния; φ — угол рыскания; x, z — линейные координаты центра масс объекта в горизонтальной плоскости; v — скорость объекта.

Введение обозначения кривизны траектории K упрощает реализацию алгоритма в программном комплексе. Кривизна определяется в виде $K = -ag n_x / v^2$, где $n_x = (R - bv^2)/m$ и n_z — соответственно продольная и боковая составляющие перегрузки; $b = c_x \rho_j S / 2$; c_x — коэффициент лобового сопротивления; ρ_j — плотность среды; S — характерная площадь (миделя); $a = 1 - \frac{A}{mg} = 1 - \frac{m_j}{m}$; $A = \rho_j g V_n$ — сила Архимеда ($H = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$); ρ_j — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_n — объем погруженной части тела, м^3 ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Примем $u = (u_1 \ u_2)^T$, где u_1 отвечает за изменение направления движения, а $u_2 = R$ — за скорость. На левом конце траектории (при $t = t_0$) задаются начальные значения $\varphi(t_0) = \varphi_0$, $x(t_0) = x_0$, $z(t_0) = z_0$, $v(t_0) = v_0$, $K(t_0) = K_0$, на правом конце — конечные φ_f , x_f , z_f , v_f , K_f . При этом минимизируется целевой функционал, в общем случае имеющий терминальную и интегральную составляющие:

$$I = V_f(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(x, u, t) dt, \quad (8)$$

где V_f, f_0 — заданные положительно определенные функции своих аргументов, имеющие непрерывные частные производные по x, t , а функция f_0 также и по u .

Примем $V_f = 0,5\Delta x_f^T \rho \Delta x$, $\Delta x_f = x(t_f) - x_f$, $f_0 = f_s + 0,5u^T k^{-1}u$, $\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_5)$, $k = \text{diag}(k_1^2, k_2^2)$; f_s — функция штрафа за попадание центра масс объекта в запретную область в виде круга радиуса r с центром в заданной точке:

$$f_s = \begin{cases} \frac{1}{2} M \left[(x - x_r)^2 + (z - z_r)^2 \right], & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2; \\ 0, & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 > r^2, \end{cases} \quad (9)$$

где x_g, z_g — координаты центра окружности; x_r, z_r — координаты точек окружности, x, z — координаты центра масс объекта (например, перекаты на реке; в данном случае гипотетически полагается, что форма переката представлена кругом радиуса r).

В зависимости от ситуации можно доопределить

$$f_s = \frac{1}{2} M \left[(x - x_r)^2 + (z - z_r)^2 \right] \left[\pm \text{sign}(z - z_r) \right], \quad (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2. \quad (10)$$

Задача состоит в оптимизации динамики системы (7) по критерию (8), которая сводится к принципу максимума, реализация которого сопряжена с решением двухточечной краевой задачи, численное решение которой затруднено необходимостью подходящего начального приближения для начальных значений вектора сопряженных переменных $p(t_0)$.

Для оптимизации процесса в реальном времени рассмотрим целевой функционал в виде критерия А. А. Красовского [9]:

$$I_1 = I + 0,5 \int_{t_0}^{t_f} u_o^T k^{-1} u_o dt, \quad (11)$$

где u_o — оптимальное значение управления u .

Представим гамильтониан H в виде

$$H = p_\phi v K + p_x v \cos \phi - p_z v \sin \phi + p_K u + 0,5 (u^T k^{-1} u + u_o^T k^{-1} u_o) + f_s. \quad (12)$$

Запишем уравнения для сопряженных переменных:

$$\begin{aligned} \dot{p}_\phi &= -\frac{\partial H}{\partial v} = p_x \sin \phi + p_z \cos \phi, \quad \dot{p}_x = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial f_s}{\partial x} = \begin{cases} -M(x - x_r), & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2; \\ 0, & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 > r^2; \end{cases} \\ \dot{p}_z &= -\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial f_s}{\partial z} = \begin{cases} -M(z - z_r), & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2; \\ 0, & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 > r^2; \end{cases} \\ \dot{p}_v &= -\frac{\partial H}{\partial v} = -p_\phi K - p_x \cos \phi + p_z \sin \phi + 2p_v b v, \quad \dot{p}_K = -\frac{\partial H}{\partial K} = -p_\phi v. \end{aligned} \quad (13)$$

Из условия $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ определим оптимальное управление:

$$u_{1o}(t) = -k_1^2 p_K(t), \quad u_{2o}(t) = -k_2^2 p_v(t) / m.$$

Здесь $p = (p_\phi \ p_x \ p_z \ p_v \ p_K)^T$ — вектор сопряженных переменных, граничные значения которых определяются из условий трансверсальности в виде:

$$\begin{aligned} p_\phi(t_f) &= \frac{\partial V_f}{\partial \phi} = \rho_1 \Delta \phi_f = \rho_1 [\phi(t_f) - \phi_f], \quad p_x(t_f) = \rho_2 [x(t_f) - x_f]; \\ p_z(t_f) &= \rho_3 [z(t_f) - z_f], \quad p_v(t_f) = \rho_4 [v(t_f) - v_f]; \\ p_K(t_f) &= \rho_5 [K(t_f) - K_f]. \end{aligned}$$

Алгоритм управления с прогнозирующей моделью состоит из приведенной последовательности действий [8, 9], выполняемых на каждом шаге:

1. Интегрируется в прямом (ускоренном) времени система уравнений (7) прогнозирующей модели (при $u = 0$) при начальном условии $x(t)$ на интервале $[t, t_f]$.
2. При найденном $x(t_f)$ определяются граничные условия для $p(t_f)$.
3. При полученных граничных условиях $x(t_f)$, $p(t_f)$ в обратном (ускоренном) времени на интервале $[t_f, t]$ интегрируются уравнения (7), (13) и определяется вектор $p(t)$.
4. Рассчитывается управление $u_{1o}(t) = -k_1^2 p_K(t)$, $u_{2o}(t) = -k_2^2 p_v(t) / m$.
5. Интегрируется исходная система (7) при $u_{1o}(t) = -k_1^2 p_K(t)$, $u_{2o}(t) = -k_2^2 p_v(t) / m$ на один шаг при постоянном значении выбранного управления с получением $x(t + \Delta t)$.

6. Далее при условии $t + \Delta t < t_f$ процесс вычислений продолжается на следующем шаге алгоритма начиная с пп. 1. Этот алгоритм с прогнозирующей моделью позволяет добиться компромиссного по точности конечного положения, определяемого весовыми коэффициентами ρ_i , $i = \overline{1, n}$. В данном случае также можно корректировать величину интервала оптимизации, введя третье управление $u_3(t) = i_f$. Тогда вектор управления примет вид $u = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$. В гамильтониан добавляется слагаемое $p_i u_3$, оптимальное управление определится выражением $u_{30}(t) = -k_3^2 H(t_f)$. Начальные условия: $\varphi(t_0) = \varphi_0$, $x(t_0) = x_0$, $z(t_0) = z_0$, $v(t_0) = v_0$, $K(t_0) = K_0$. Задаются конечные требования: φ_f , x_f , z_f , v_f , K_f . Для штрафной функции круга: $x_g = 1100$ м, $z_g = 0$, радиус $r = 10$ м.

Алгоритмы отработки оптимальных траекторных задающих воздействий могут строиться на основе различных систем стабилизации. Продуктивным является применение СОРЕ А. А. Красовского [4].

В данном исследовании для стабилизации в целях упрощения применен частный случай СОРЕ — пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.

$$u = r_1 + r_2 \int_0^t e d\tau + r_3 \dot{e}. \quad (14)$$

Если решать обратную задачу оптимизации с целью получения целевого функционала для управления в виде ПИД-регулятора, то оказывается, что нужно использовать СОРЕ. В [10] показано, что ПИД-регулятор является частным случаем СОРЕ. При этом измеряется интеграл

$$z(t) = \int_0^t e dt \quad (15)$$

от рассогласования e в трех точках, а информационный полином выбирается без самоорганизации, аппроксимирующий в виде параболы.

Оптимальное управление по критерию А. А. Красовского (11): $V_f = 0,5\beta_1 x_1^2(t_c)$, $f_0 = 0,5\beta_2 x_1^2(t_c) + 0,5k_p^{-1}(u^2 + u_0^2)$, $t_0 = 0$, $t_f = t_c$, $x_1 = z$) формируется регулятором в виде $u = -k_p p_{i+1}$, где β_1 , β_2 , t_c заданы, а сопряженные переменные определяются в виде [5]:

$$p_j = \frac{t_c^{j-1}}{(j-1)!} \sum_{i=0}^l a_i t_c^i \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 t_c}{l+i} \right). \quad (16)$$

Здесь u — управление, где l — порядок полинома ($l = 2$), так как используется парабола; β_1 , β_2 , k_p — весовые коэффициенты в целевом функционале; t_c — интервал оптимизации, a_i , $i = 0, 2$ — коэффициенты полинома $z(t) = a_2 + a_1 t + a_0$.

В этом частном случае структура управления совпадает со структурой ПИД-регулятора, а коэффициенты ПИД-регулятора вычисляются однозначно через коэффициенты функционала и величину интервала оптимизации [10]:

$$r_1 = \frac{1}{24} k_p \beta_2 t_c^4; \quad r_2 = -k_p \frac{t_c^2}{2} \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 t_c}{3} \right); \quad r_3 = -\frac{1}{120} k_p \beta_2 t_c^5. \quad (17)$$

В работе стабилизация судна на оптимальной траектории его центра масс решалась с помощью СОРЕ (ПИД-регулятора): $\delta = \delta_0 + u_{\text{ПИД}} = \delta_0 + l_1 K_\Delta + l_2 \int_0^t K_\Delta dt + l_3 \dot{K}_\Delta$, $\delta_0 = \frac{-mv^2 K + R \sin \beta}{q S c_z^\delta} - \frac{c_z^\beta \beta}{c_z^\delta}$, $K_\Delta = K_c - K_{\text{им}}$; K_c — кривизна траектории центра масс (система (7)); $K_{\text{им}}$ — кривизна траектории имитационной модели (система (2)).

На рис. 4 представлена траектория движения судна при оптимизации по критерию А. А. Красовского, на рис. 5 — соответствующая схема движения. На рис. 6 представлен график зависимости $t_f(t)$, который подтверждает гибкость алгоритма при смене условий плавания.

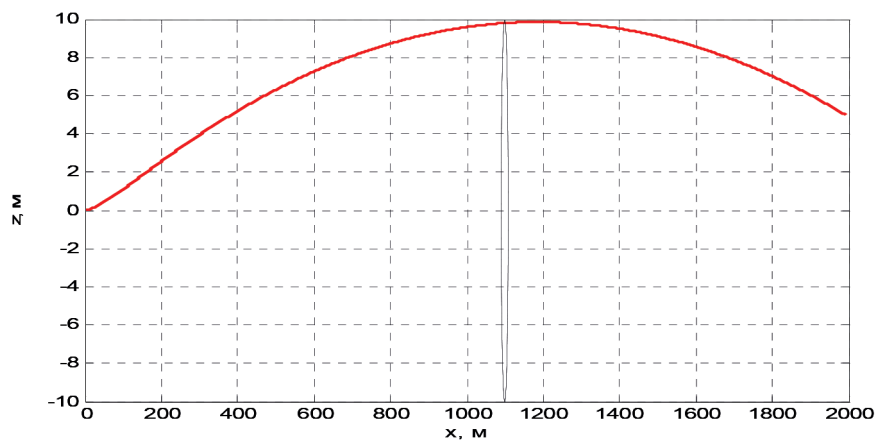


Рис. 4. Траектория движения судна при оптимизации по критерию А. А. Красовского
Fig. 4. Vessel trajectory under optimization according to the Krasovsky criterion



Рис. 5. Схема движения судна
(<https://fleetphoto.ru/photo/00/81/12/81126.jpg>)
Fig. 5. Vessel motion diagram

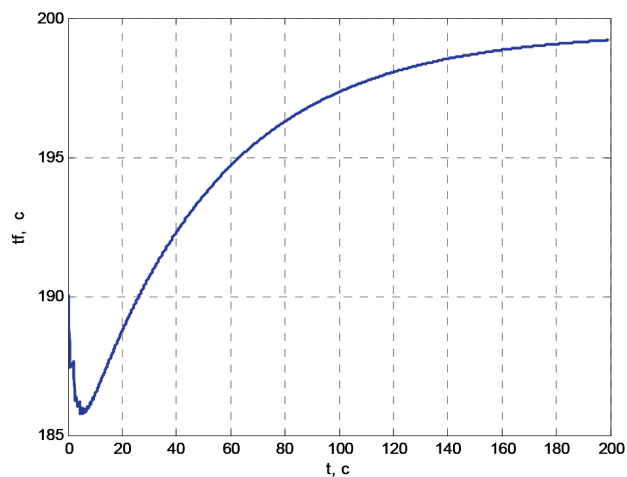


Рис. 6. График зависимости $t_f(t)$
Fig. 6. Dependence graph $t_f(t)$

Размеры судна, а также численные параметры задачи имеют демонстрационный характер, что позволяет оценить их адекватность. Например, при смене координат конечной точки алгоритм успешно осуществляет синтез управления и автоматически корректирует время движения (интервал оптимизации).

В работе [10] аналогично производилась стабилизация автоматического подводного аппарата на оптимальной траектории, формируемой по алгоритму с коррекцией структуры управления, полученной на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина. В работе [11] решалась задача оптимизации управления процессом выравнивания уровней воды между камерой судоходного шлюза с распределением воды и бьефом с использованием алгоритма с прогнозирующей моделью.

Обсуждение (Discussion)

При движении судна при действии возмущений и зон навигационной опасности движения приходится использовать достаточно сложные математические модели движения. Непосредственно применить к ним методы оптимального управления не представляется возможным. Как правило, задача оптимального управления решается для упрощенной модели центра масс подвижного объекта. Далее следует решение задачи стабилизации объекта на сформированной траектории.

Построение линеаризованных моделей судна в отклонениях и решение задачи оптимальной стабилизации требует больших вычислительных затрат. Необходимость принимать решение по управлению судном в реальном времени приводит к использованию вместо математической модели информационной, что реализовано в СОРЭ А. А. Красовского. В данной статье весовые коэффициенты ПИД-регулятора определяются из аналитических выражений, полученных для СОРЭ. Результаты моделирования подтверждают работоспособность представленных алгоритмов.

Заключение (Conclusion)

В работе приведены доказательства возможности маневрирования безэкипажного судна в сложных навигационных условиях посредством синтеза оптимального управления. Результаты проведенного исследования имеют практическое значение в области эксплуатации внутренних водных путей.

В дальнейшем необходимо проведение исследования по формированию модели измерений с оценкой вектора состояния (с учетом интеграции данных от измерителей) посредством фильтра Калмана.

Целесообразно также рассмотреть вопрос о возможности подведения судна к подходному каналу шлюза с выбором иерархии из двух целевых функционалов [8], где верхний уровень отвечает за угол подхода судна к цели после обхода сложного участка движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов С. М. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна / С. М. Власов, О. И. Борисов, В. С. Громов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17. — № 1. — С. 18–25. — EDN VKQQMT. DOI: 10.17587/mau.17.18–25.
2. Мовчан И. М. Разработка системы динамического позиционирования для маломерного судна / И. М. Мовчан, Д. А. Оськин, А. А. Горшков // Вестник Морского государственного университета. — 2023. — № 92. — С. 4–7. — EDN XIZICG.
3. Кабанов Д. С. Синтез алгоритма оптимального программно-позиционного управления многорежимным автоматическим подводным аппаратом / Д. С. Кабанов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — № 1. — С. 60–66. — EDN RTVYAD.
4. Красовский А. А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции / А. А. Красовский // Автоматика и телемеханика. — 1994. — Т. 11. — С. 97–112.
5. Каретников В. В. Лимитирующие навигационно-гидрографические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для управления судном при прохождении шлюзов / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев // Вестник государственного университета морского и речного

флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 825–836. — EDN HXSMKV. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836.

6. Галеев Р. Э. Повышение навигационной безопасности маневрирования судов на внутренних водных путях на основе реализации технологии дополненной реальности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. Э. Галеев. — Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. — EDN IQWNXQ.

7. Karetnikov V. Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways / V. Karetnikov, G. Chistyakov, E. Ol'khovik // E3S Web Conf. — 2020. — Vol. 157. — Pp. 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.

8. Пелевин А. Е. Методика построения модели движения судна и синтез алгоритмов управления на ее основе / А. Е. Пелевин, А. В. Лопарев, Е. В. Лукоянов, А. М. Столярова // Гирскопия и навигация. — 2025. — Т. 33. — № 1(128). — С. 52–63. — EDN GEUEZD.

9. Литов Д. В. Некоторые аспекты построения структуры системы управления морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) / Д. В. Литов, О. С. Хватов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 35–43. — EDN YRHQTS.

10. Буцанец А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Буцанец. — Санкт-Петербург: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — EDN MFMQJR.

11. Гарибин П. А. Управление процессом выравнивания уровней воды между камерой судоходного шлюза с распределением воды и бьефом / П. А. Гарибин, С. А. Кабанов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 555–562. — EDN FKPVXA. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-555-562.

REFERENCES

1. Vlasov, S. M., O. I. Borisov, V. S. Gromov et al. “Algorithms of adaptive and robust output control for a robotic prototype of a surface vessel.” *mEchatronics, Automation, Control* 17.1 (2016): 18–25. DOI: 10.17587/mau.17.18–25.

2. Movchan, I. M., D. A. Os'kin and A. A. Gorshkov. “Development of a dynamic positioning system for a small vessel.” *Bulletin of The Maritime State University* 92 (2023): 4–7.

3. Kabanov, D. S. “Optimal real-time control algorithm design for multimode automatic underwater vehicle.” *mEchatronics, Automation, Control* 1 (2014): 60–66.

4. Krasovskiy, A. A. “Adaptivnyy optimal'nyy regul'yator s peremennym por'yadkom nablyudatelya i vremem ekstrapolyatsii.” *Automation and Remote Control* 11 (1994): 97–112.

5. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov and Yu. G. Andreev. “Limiting navigational and hydrographic factors when using 3d electronic navigation charts for ship handling during locks passage.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 825–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836.

6. Galeev, R. E. *Povyshenie navigatsionnoy bezopasnosti manevrirovaniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh na osnove realizatsii tekhnologii dopolnennoy real'nosti*. PhD diss. Nizhnij Novgorod, 2024.

7. Karetnikov, V., G. Chistyakov and E. Ol'khovik. “Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways.” *E3S Web Conf.* 157 (2020): 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.

8. Pelevin, A. E., A. V. Loparev, E. V. Lukoyanov and A. M. Stolyarova. “Procedure for Constructing the Ship Motion Model and Synthesizing Model-Based Control Algorithms.” *Gyroscopy and Navigation* 16.1 (2025): 34–40. DOI: 10.1134/S2075108725700105.

9. Litov, D. V. and O. S. Khvatov. “Some aspects of control system structure building for maritime autonomous and remotely controlled surface ships (MASS).” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 78 (2025): 35–43.

10. Butsanets, A. A. *Organizatsiya sistemy distantsionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskim flotom dlya obespecheniya sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh*. PhD diss. St. Petersburg, 2021.

11. Garibin, P. A. and S. A. Kabanov. “Control of the water leveling process between the shipping lock chamber with water distribution and the pool.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 555–562. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-555-562.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарибин Павел Андреевич —

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

Кабанов Сергей Александрович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ» им.
Д. Ф. Устинова»
190005, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
1-я Красноармейская ул., 1
e-mail: kaba-sa@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Garibin, Pavel A. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Kabanov, Sergei A. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Baltic State Technical University “VOENMEH”
named after D. F. Ustinov
1, 1-ya Krasnoarmeiskaya Str.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: kaba-sa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 января 2026 г.

Received: January 11, 2026.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-284-296

EDN MHDSVS

УДК 621.43.074

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОГО ВИХРЯ

И. Р. Галиев, Д. С. Новиков, Хлаинг Мьо Тхет

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена изучению влияния формы камеры сгорания поршневого двигателя внутреннего сгорания на газодинамические характеристики воздушного вихря, т. е. на среднюю и пульсационную скорость потока, интенсивность турбулентности и масштаб турбулентности Колмогорова. Проведенный обзор литературы показал, что газодинамические характеристики воздушного вихря оказывают значительное влияние на динамику процесса сгорания топлива и, следовательно, на экологические и энергетические характеристики двигателя. Отмечается, что улучшение газодинамических характеристик воздушного вихря является важным этапом конструирования новых двигателей. Изменение формы камеры сгорания осуществлялось с помощью поршней с разной формой днища: плоской, полусферической, «Гессельман» и «ЯМЗ» с усеченным конусом. Представлена методика численного моделирования поршневого двигателя. Проведенный анализ сеточной сходимости при расчете характеристик турбулентности воздушного вихря выявил целесообразность применения гексаэдрической формы ячеек размером 0,5–1 мм конечно-элементной сетки двигателя. На основании этого сделан вывод о том, что при расчете термодинамических характеристик допустимо использование грубых сеток с размером ячейки более 4 мм. Применение в ходе данного исследования методов численного моделирования, реализованных в программном комплексе Ansys Fluent, позволило детально изучить газодинамические характеристики потока и их зависимость от угла поворота коленчатого вала и формы камеры сгорания. Показано, что степень влияния формы камеры сгорания на газодинамические характеристики в значительной степени зависит от угла поворота коленчатого вала двигателя. Выявлено, что для всех форм камер сгорания при приближении поршня к верхней мертвой точке наблюдается пик интенсивности турбулентности и минимум масштаба Колмогорова, а следовательно, в верхней мертвой точке влияние турбулентности на процесс сгорания является максимальным. Материалы работы могут иметь практическое применение при исследовании рабочего процесса двигателя с использованием методов вычислительной гидродинамики.

Ключевые слова: поршневой двигатель, вычислительная гидродинамика, турбулентность, пульсационная скорость, масштаб Колмогорова, интенсивность турбулентности, воздушный вихрь, днище поршня, камера сгорания, CFD-моделирование.

Для цитирования:

Галиев И. Р. Влияние формы камеры сгорания на газодинамические характеристики воздушного вихря / И. Р. Галиев, Д. С. Новиков, Хлаинг Мьо Тхет // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 284–296. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-284-296. — EDN MHDSVS.

INFLUENCE OF COMBUSTION CHAMBER SHAPE ON THE GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AIR SWIRL

I. R. Galiev, D. S. Novikov, Hlaing Myo Thet

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

The article is devoted to the study of the influence of the combustion chamber shape of a piston internal combustion engine on the gas-dynamic characteristics of the air swirl, i. e., on the mean and fluctuating flow

velocity, turbulence intensity, and the Kolmogorov scale. The literature review has shown that the gas-dynamic characteristics of the air swirl significantly affect the dynamics of the fuel combustion process and, consequently, the environmental and energy performance of the engine. It is noted that improving the gas-dynamic characteristics of the air swirl is an important stage in the design of new engines. The combustion chamber shape was varied using pistons with different crown geometries: flat, hemispherical, Hesselman, and YaMZ with a truncated cone. A methodology for numerical simulation of a piston engine is presented. The grid convergence analysis in calculating the turbulence characteristics of the air swirl has demonstrated the feasibility of using hexahedral cells with a size of 0.5–1 mm in the computational mesh of the engine. Based on this, it is concluded that when calculating thermodynamic characteristics, the use of course meshes with a cell size greater than 4 mm is acceptable. The application of numerical simulation methods implemented in the ANSYS Fluent software package made it possible to study in detail the gas-dynamic characteristics of the flow and their dependence on the crankshaft rotation angle and the combustion chamber shape. It is shown that the degree of influence of the combustion chamber shape on the gas-dynamic characteristics significantly depends on the crankshaft rotation angle. It is established that for all combustion chamber shapes, as the piston approaches top dead center, a peak in turbulence intensity and a minimum Kolmogorov scale are observed; therefore, at top dead center, the influence of turbulence on the combustion process is maximal. The results may be of practical relevance for studying engine working processes using computational fluid dynamics methods.

Keywords: piston engine, computational fluid dynamics, turbulence, fluctuating velocity, Kolmogorov scale, turbulence intensity, air swirl, piston crown, combustion chamber, CFD modeling.

For citation:

Galiev, Ildar R., D. S. Novikov and Hlaing Myo Thet. "Influence of combustion chamber shape on the gas-dynamic characteristics of air swirl." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 284–296. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-284-296.

Введение (Introduction)

Энергетическая и экологическая безопасность судовых поршневых двигателей является приоритетным направлением судостроения во всем мире [1]. Известно, что газодинамические процессы, протекающие в цилиндре двигателя, значительно влияют на смесеобразование топлива с воздухом, сгорание горючей смеси, образование токсичных веществ и теплонапряженность камеры сгорания [2]. Чрезмерная турбулизация воздушного заряда может привести к погасанию пламени, а недостаточная турбулизация является причиной затяжного сгорания топлива [3]. Поэтому учет газодинамических характеристик воздушного вихря, т. е. средней и пульсационной скорости потока, интенсивности турбулентности, формы закрутки заряда и масштабов турбулентности, является обязательной процедурой при конструировании и модернизации камеры сгорания двигателя. Конструктивное регулирование газодинамических характеристик двигателя обеспечивается изменением формы впускного канала, головки блока цилиндров, днища поршня или установкой ширмы на впускной клапан.

В данной статье исследуется влияние формы камеры сгорания, так как она оказывает наибольшее влияние на газодинамические характеристики во время процесса сгорания топлива. Кроме того, в настоящее время существуют десятки модификаций камер сгорания, и выбор оптимальной формы продолжает оставаться нерешенной научной проблемой. В данном направлении большую работу проводят как отечественные [4–6], так и зарубежные [7, 8] ученые.

В исследовании специалистов из Hyundai Motor Company [7] экспериментальными и численными методами изучено влияние формы камеры сгорания на закрутку воздушного заряда в двухцилиндровом двигателе. Выявлено, что даже незначительные изменения формы камеры сгорания могут увеличить турбулентную кинетическую энергию на 10 %, а скорость закрутки на 7 %. В работе [8] с применением методов вычислительной гидродинамики (CFD) изучалась скорость закрутки заряда в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с непосредственным впрыском топлива. Был сделан вывод, что смена днища поршня с плоской на полусферическую позволяет увеличить турбулентную кинетическую энергию заряда на 17 % и однородность топливовоздушной смеси на 20 %.

Обзор литературы показал рост числа научных работ, в которых применяются численные методы исследования газодинамических процессов в цилиндре двигателя. Данную тенденцию

можно объяснить возможностью более детально, в отличие от экспериментов, изучить особенности воздушного вихря, а также ростом производительности вычислительной техники [9, 10]. В работе [11] приводится методика численного исследования закрутки заряда, реализованная в программном комплексе *Ansys Fluent*. Сравнение расчетных и экспериментальных значений скорости воздушного потока и скорости тепловыделения показало сходимость от 91 до 95 %.

Таким образом, анализ литературы показал, что газодинамические характеристики воздушного вихря значительно влияют на динамику процесса сгорания топлива и, следовательно, на экологические и энергетические характеристики двигателя. Поэтому улучшение данных характеристик воздушного вихря является важным этапом конструирования новых двигателей. Несмотря на многочисленные исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными, до конца не изучено влияние конструктивных особенностей камеры сгорания на газодинамические характеристики воздушного вихря, что существенно усложняет работу инженеров при проектировании новых двигателей.

Целью работы является изучение влияния формы камеры сгорания поршневого двигателя внутреннего сгорания на газодинамические характеристики воздушного вихря, т. е. на среднюю и пульсационную скорость потока, интенсивность турбулентности, форму закрутки заряда и масштаб турбулентности Колмогорова.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Объектом исследования являлся газопоршневой двигатель 6ЧН 12/14 (производитель *Volvo*; модель двигателя TD-102; частота вращения коленчатого вала 1200 мин^{-1} ; степень сжатия 12; диаметр цилиндра 120 мм; ход поршня 140 мм). Предметом исследования были газодинамические характеристики воздушного вихря: средняя и пульсационная скорость потока, интенсивность турбулентности, форма закрутки и масштаб турбулентности Колмогорова. Выбор марки двигателя обусловлен наличием экспериментальных данных [12] средней и пульсационной скорости воздушного потока, что открывает возможность валидации результатов численного моделирования. Расчет проводился на режиме холодной прокрутки двигателя.

Изучение влияния формы камеры сгорания поршневого двигателя на газодинамические характеристики воздушного вихря осуществлялось с применением методов вычислительной гидродинамики, реализованных в программном комплексе *Ansys Fluent*. Это позволило в деталях изучить газодинамические характеристики потока и их зависимость от угла поворота коленчатого вала (УПКВ) и формы камеры сгорания.

Методика проведения численного моделирования двигателя соответствовала ГОСТу Р 57700.9–2018 «Численное моделирование физических процессов» и включала следующие этапы:

- создание *CAD* модели камеры сгорания, впускного и выпускного канала двигателя;
- построение структурированной конечно-элементной сетки;
- задание граничных условий и выбор модели турбулентности в *Ansys Fluent*;
- запуск расчета в *Ansys Fluent*;
- анализ сеточной сходимости и (при необходимости) калибровка конечно-элементной сетки;
- анализ результатов *CFD* моделирования двигателя в *Ansys CFD-Post*;
- валидация результатов моделирования путем их сравнения с экспериментальными данными.

На рис. 1 представлена 3D модель и структурированная конечно-элементная сетка впускного канала и камеры сгорания исследуемого двигателя.

Построение сетки осуществлялось в программе *Ansys SpaceClaim Mesh*. Выбор гексаэдрической форм, ячейками сетки был обусловлен меньшими, чем у тетраэдрической и призматической формы ячеек сетки, затратами «машинного времени» расчета, меньшим количеством ячеек сетки для получения сеточной сходимости, меньшими затратами оперативной памяти компьютера и лучшим сеточным разрешением в пограничных слоях.

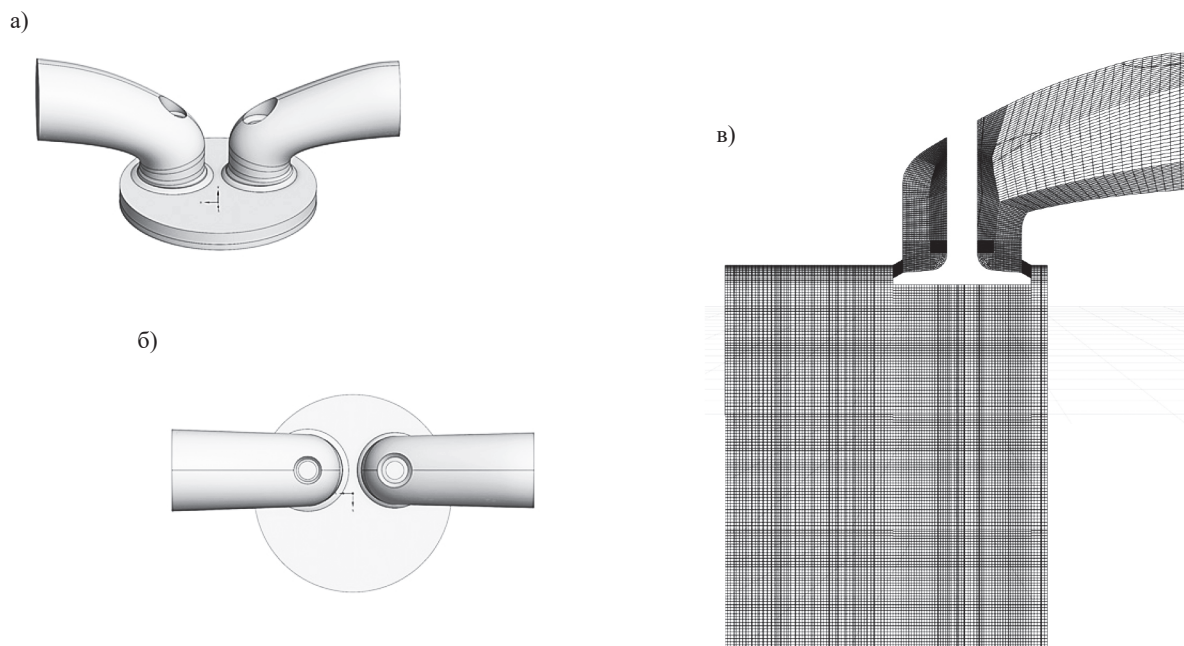


Рис. 1. 3D модель двигателя Volvo TD102: а — вид сбоку; б — вид сверху;
в — структура конечно-элементной модели двигателя
Fig. 1. 3D model of the Volvo TD102 engine: (a) side view; (b) top view;
(c) computational mesh structure of the engine

Автоматическое построение динамических сеток обеспечивалось применением алгоритмов *Remeshing* и *Smoothing*, встроенных в программный код *Ansys Fluent*. Для определения оптимального размера ячейки конечно-элементной сетки был выполнен анализ сеточной сходимости, который заключался в изучении влияния размера сетки в камере сгорания от 0,5 до 4 мм на термодинамические (рис. 2, а и б) и газодинамические (рис. 2, в и г) характеристики двигателя.

Анализ рис. 2, а и б показал, что термодинамические характеристики (давление и средняя температура в камере сгорания) практически не изменяются (погрешность менее 1 %) при укрупнении сетки в 8 раз. Сравнение давления и температуры, полученных в результате *CFD* моделирования, со значениями, рассчитанными по методике Гриневецкого – Мазинга, показало сходимость более 98 %. Поэтому при численном моделировании термодинамических процессов в двигателе допустимо использование грубых сеток с размером ячейки более 4 мм. На рис. 2, в и г представлены зависимости средней и пульсационной скорости потока от размера ячеек конечно-элементной сетки. Обнаружено, что размер ячеек значительно (до 32 %) влияет на газодинамические характеристики потока. Это объясняется тем, что скорость потока является локальной характеристикой (в отличие от давления) и значительно изменяется в объеме камеры сгорания. Поэтому численное моделирование газодинамических характеристик является более требовательным к размеру и форме ячеек сетки.

На рис. 2, в видно, что значения средней скорости потока при размере ячейки, равной 1 мм, отличаются менее 1 % от скорости, рассчитанной при использовании ячейки размером 0,5 мм. Применение ячеек размером 1 мм приводит к увеличению погрешности расчета турбулентных пульсаций скорости от 2 % до 3,7 % (см. рис. 2, г).

Сравнение расчетных и экспериментальных значений средней (см. рис. 2, в) и пульсационной (см. рис. 2, г) скорости потока показало, что сетка с размером ячеек от 0,5 мм до 1 мм обеспечивает хорошую сходимость данных. Таким образом, размер ячейки от 0,5 мм до 1 мм является оптимальным с точки зрения точности и продолжительности *CFD* расчета газодинамических характеристик воздушного заряда в цилиндре двигателя.

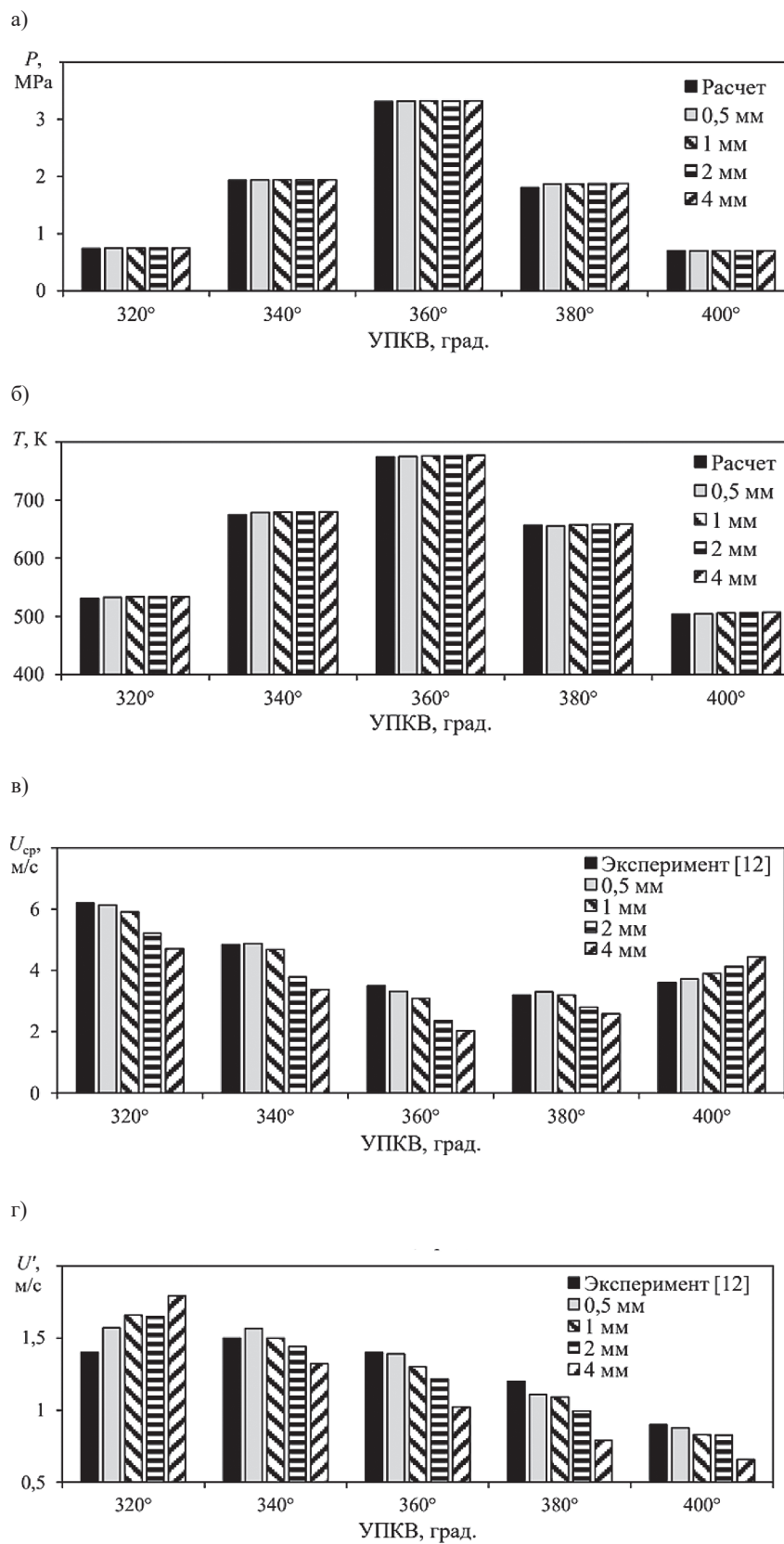


Рис. 2. Зависимость от угла поворота коленчатого вала и размера ячеек конечно-элементной сетки:

а — давления; б — температуры; в, г — средней и пульсационной скорости
Fig. 2. Dependence on the crankshaft rotation angle and computational mesh cell size: (a) pressure; (b) temperature; (c), (d) mean and fluctuating velocity

Характеристики турбулентности в цилиндре двигателя были вычислены авторами с использованием k - ω SST (Shear Stress Transport) модели турбулентности в интервале УПКВ от -40° до 40° после верхней мертвой точки (ВМТ). Модель турбулентности является комбинацией двух типов моделей: стандартной k - ε , используемой для моделирования турбулентности в объеме камеры сгорания, и k - ω модели Уилкоккса, применяемой для моделирования пристеночной турбулентности [13]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \ddot{A}} + \frac{\partial \rho k W_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega;$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \omega W_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_3 \omega^2,$$

где k — кинетическая энергия турбулентности; μ_t — турбулентная вязкость; σ_{k3} и $\sigma_{\omega 3}$ — эмпирические константы; P_k — скорость генерации турбулентной энергии; C_μ — константа, $C_\mu = 0,0845$; ω — величина, обратная времени жизни крупных вихрей; F_1 — функция-переключатель; α_3 — обратное число Прандтля; β_3 — эмпирический коэффициент.

Выбор k - ω SST модели турбулентности обусловлен хорошей сходимостью результатов CFD моделирования (см. рис. 2, в, з) с экспериментальными данными, полученными учеными из Лундского университета [12].

Интенсивность турбулентности вихревого потока определялась через отношение пульсационной к средней скорости потока. Пульсационная скорость рассчитывалась с использованием значений кинетической энергии турбулентности k :

$$U' = \sqrt{\frac{2k}{3}}.$$

При численном моделировании применялся итерационный подход, т. е. на каждой итерации решалась система дифференциальных уравнений, описывающих термо- и газодинамические процессы в двигателе внутреннего сгорания. В настоящее время отсутствует методика определения оптимального числа итераций, обеспечивающих устойчивое решение уравнений Навье – Стокса, неразрывности, энергии и замыкания моделей турбулентности.

Известно, что недостаточное число итераций приводит к увеличению погрешности вычислений, а избыточное число итераций увеличивает от 1,5 до 10 раз время численного моделирования. Поэтому в данной работе авторами было изучено влияние числа итераций на устойчивость решения уравнений, применяемых при CFD моделировании двигателя: Навье – Стокса, неразрывности, энергии и замыкания модели турбулентности k - ω SST. В результате проведенной работы было выявлено, что наибольшее количество итераций (от 100 до 190) необходимо для уравнений замыкания k - ω SST модели турбулентности во время процесса впуска (рис. 3).

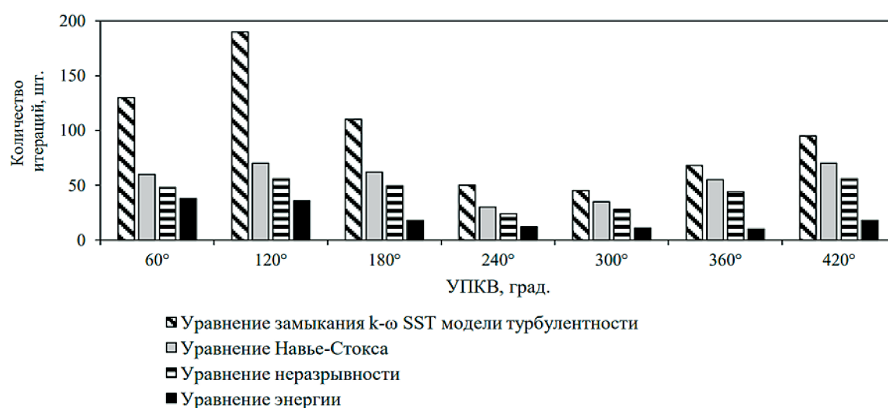


Рис. 3. Влияние УПКВ на необходимое число итераций, обеспечивающих устойчивое решение уравнений Навье – Стокса, неразрывности, энергии и замыкания k - ω SST модели турбулентности

Fig. 3. Effect of crankshaft rotation angle on the number of iterations required for stable solution of the Navier–Stokes, continuity, energy, and k - ω SST turbulence model equations

Для расчета термодинамических показателей рабочего процесса двигателя, определяемых уравнением энергии, требуется наименьшее количество итераций. Например, для определения давления и температуры во время процесса сгорания достаточно 10 итераций. Расчет газодинамических характеристик вихревого потока в цилиндре двигателя, определяемых уравнениями Навье – Стокса, требует не менее 40 итераций.

Изменение формы камеры сгорания осуществлялось применением поршней с разной конструкцией днища. Постоянство степени сжатия двигателя обеспечивалось изменением расстояния от поверхности днища поршня до головки блока цилиндров. Для исследования были выбраны наиболее распространенные в двигателестроении формы: плоская, полусферическая, «Гессельман» и «ЯМЗ» с усеченным конусом (рис. 4).

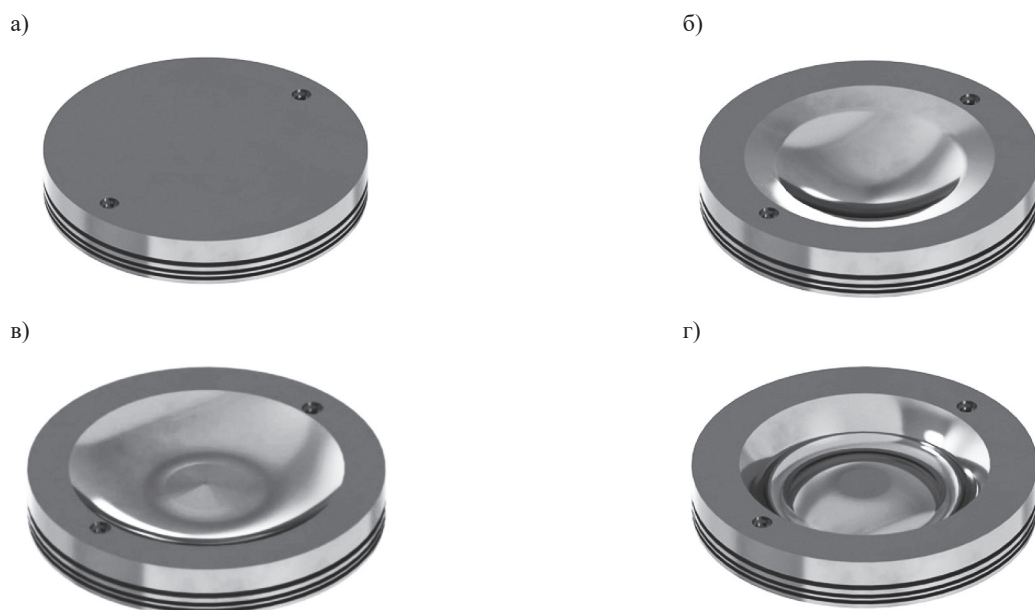


Рис. 4. Формы днища поршня: а — плоская; б — полусферическая;

в — «Гессельман»; г — «ЯМЗ» с усеченным конусом

Fig. 4. Piston crown geometries: (a) flat; (b) hemispherical;

(c) Hesselman; (d) YaMZ with a truncated cone

Для каждой формы днища поршня посчитан коэффициент вытеснения (*squish*), равный отношению площади вытеснения поршня к площади поперечного сечения цилиндра двигателя. Данный коэффициент позволяет оценить влияние конструкции поршня на скорость переноса воздуха из надпоршневого пространства в камеру сгорания, расположенную в поршне. Таким образом, физико-математические методы, используемые в данном исследовании, являются современными и применимыми для изучения газодинамических характеристик в поршневых двигателях.

Результаты (Results)

В результате проведенного *CFD* моделирования были получены численные значения газодинамических характеристик в цилиндре двигателя и выявлена их зависимость от УПКВ и формы днища поршня. На рис. 5 представлено влияние формы днища поршня на закрутку воздуха в камере сгорания при положении поршня в ВМТ.

На рис. 5 видно, что конструкция днища поршня значительно влияет на интенсивность и форму закрутки воздушного заряда. Использование поршня с плоским днищем (рис. 5, а) приводит к возникновению вихрей в периферийной зоне камеры сгорания, что отрицательно влияет на динамику процесса сгорания. В свою очередь, «Гессельман» (рис. 5, в) и полусферическая (рис. 5, б) форма днища поршня обеспечивают закрутку воздуха в центральной зоне камеры сго-

рания. В результате увеличивается турбулентная скорость распространения пламени, сгорание становится более интенсивным. Обзор литературы показал, что представленное в статье распределение вихрей в камере сгорания с плоской и полусферической формой днища поршня наблюдается в других двигателях с аналогичной формой поршня [14–16].

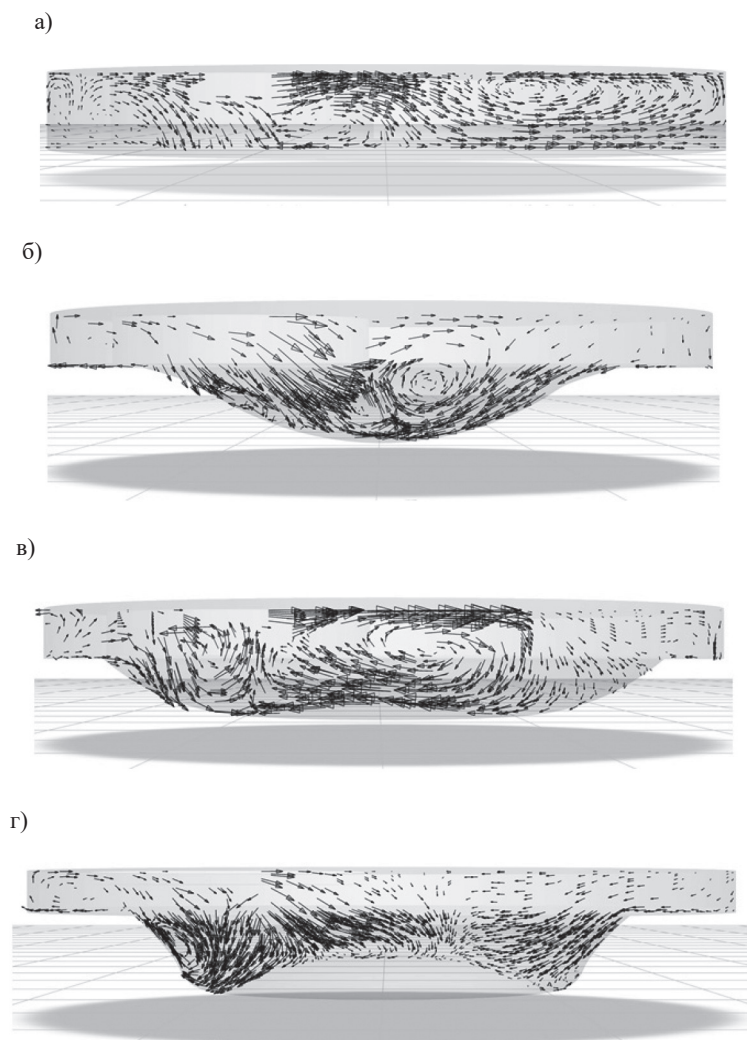


Рис. 5. Влияние на закрутку воздуха в камере сгорания формы днища поршня:
а — плоская; б — полусферическая; в — «Гессельман»; г — «ЯМЗ» с усеченным конусом
Fig. 5. Effect of piston crown geometry on air swirl in the combustion chamber:
(a) flat; (b) hemispherical; (c) Hesselman; (d) YaMZ with a truncated cone

Анализ результатов *CFD* моделирования рабочего процесса двигателя выявил, что во время процесса сгорания размер воздушного вихря определяется расстоянием от поверхности днища поршня до головки блока цилиндров. Это справедливо для всех конструкций поршней, применяемых в исследовании, и УПКВ, находящихся в интервале от -40° до 40° после ВМТ. Таким образом, диаметр воздушного вихря D можно определить по формуле

$$D = (H + S) \cdot 0,8,$$

где H — расстояние от поверхности днища поршня до головки блока цилиндров при положении поршня в ВМТ, м; S — ход поршня, м.

На рис. 6 приведены гистограммы, демонстрирующие влияние формы днища поршня и УПКВ на газодинамические характеристики воздушного вихря. Выявлено, что для всех конструкций поршней, используемых в работе, влияние УПКВ на газодинамические характеристики проявляется практически идентично. Например, увеличение УПКВ с -40° до -20° способствует изменению средней

скорости потока на 23 % для плоской формы днища поршня, 25 % — полусферической, 22 % — «Гессельман» и 26 % — «ЯМЗ». Таким образом, форма днища поршня практически не оказывает существенного влияния на изменение газодинамических характеристик при возвратно-поступательном движении поршня.

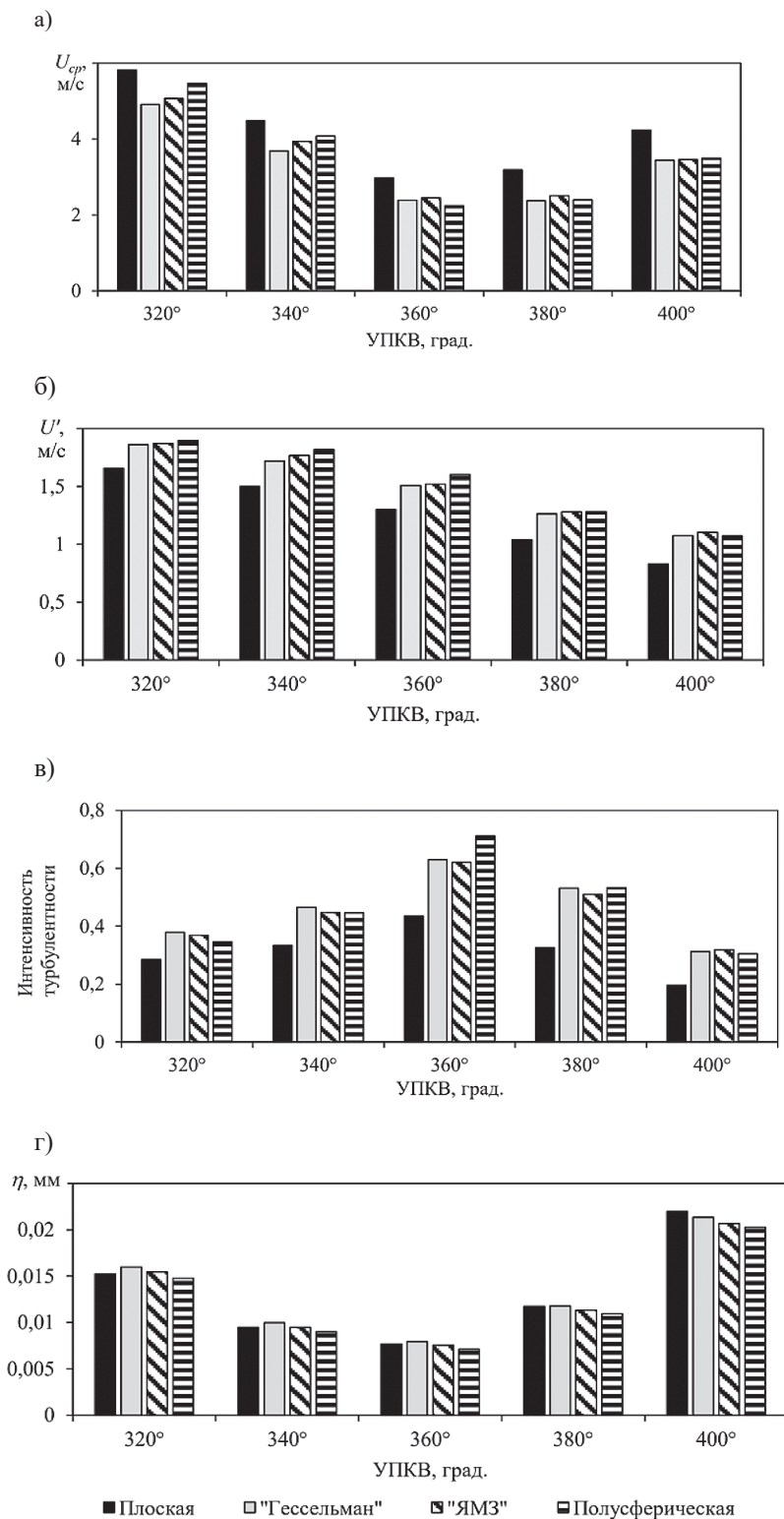


Рис. 6. Влияние формы днища поршня на газодинамические характеристики воздушного потока:

а — среднюю скорость; б — пульсационную скорость;

в — интенсивность турбулентности; г — масштаб Колмогорова

Fig. 6. Effect of piston crown geometry on the gas-dynamic characteristics of the air flow:

(a) mean velocity; (b) fluctuating velocity; (c) turbulence intensity; (d) Kolmogorov scale

В свою очередь, степень влияния формы днища поршня на газодинамические характеристики зависит от УПКВ. Максимальные изменения характеристик воздушного потока при изменении формы днища поршня наблюдаются при УПКВ от -20° до 20° , что связано с уменьшением надпоршневого объема камеры сгорания. Например, при УПКВ, равном -40° , изменение формы днища поршня с плоской на полусферическую приводит к росту интенсивности турбулентности на 21 %, а при 0° увеличение интенсивности турбулентности составляет уже 60 %, что связано с увеличением влияния коэффициента вытеснения *squish* при приближении поршня к ВМТ. Чем выше коэффициент вытеснения, тем больше скорость перемещения воздуха из надпоршневого пространства в камеру сгорания, расположенную в днище поршня. Поэтому интенсивность турбулентности у поршня с полусферической формой днища имеет наибольшие значения.

Анализ гистограмм скорости (рис. 6, а) и интенсивности турбулентности (рис. 6, в) выявил схожее по силе влияние на них УПКВ и формы днища поршня. Так, для плоской формы днища поршня увеличение УПКВ с -20° до 0° приводит к изменению средней скорости на 49 % и интенсивности турбулентности на 51 %. При изменении конструкции поршня максимальное изменение скорости потока составило 26 %, интенсивности турбулентности — 60 % (при смене плоской формы днища на полусферическую и УПКВ, равном 0°).

Степень влияния турбулентности на скорость химических реакций во фронте пламени существенно зависит от масштаба Колмогорова, представляющего собой наименьший по размеру вихрь. Известно, чем меньше масштаб Колмогорова, тем больше вихрей проникают в зону химических реакций пламени, что может привести к снижению скорости сгорания топлива или погасанию пламени [2].

Определение масштабов турбулентности выполнялось с применением первой гипотезы Колмогорова по формуле

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4},$$

где η — масштаб Колмогорова; v — кинематическая вязкость; ε — скорость диссипации энергии.

На рис. 6, г показано, что для всех конструкций поршней минимальные значения масштаба Колмогорова наблюдаются при положении поршня в ВМТ. Следовательно, в этот момент влияние турбулентности на процесс сгорания будет максимальным. Сравнительный анализ показал, что УПКВ оказывает более значительное влияние на масштаб Колмогорова в отличие от формы камеры сгорания. Например, увеличение УПКВ с -20° до 0° приводит к уменьшению масштабов Колмогорова на 49,5 %, а максимальное изменение масштаба Колмогорова при смене формы днища поршня составляет всего 8 %. Анализ источников [17, 18], показал, что значения масштабов Колмогорова, представленных в настоящей статье, соответствуют порядку данных, полученных в указанных источниках зарубежными учеными. В исследовании шведских ученых из *Eindhoven University of Technology* [17] выявлено, что в ВМТ и частоте вращения коленчатого вала, равной 1000 мин^{-1} , масштаб Колмогорова находится в диапазоне от 0,01 до 0,1 мм. Экспериментальная работа американских ученых из *West Virginia University* [18] показала, что масштаб η находится в диапазоне 0,005–0,08 мм при частоте вращения 1600 мин^{-1} .

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методика численного моделирования поршневого двигателя. Проведенный анализ сеточной сходимости при расчете характеристик турбулентности воздушного вихря выявил целесообразность применения гексаэдрической формы ячеек размером 0,5–1 мм. При CFD расчете термодинамических характеристик двигателя допустимо использование грубых сеток с размером ячеек более 4 мм.
2. Изучено влияние УПКВ на число итераций, обеспечивающих устойчивое решение дифференциальных уравнений, описывающих термо- и газодинамические процессы в двигателе

внутреннего сгорания. Выявлено, что наибольшее количество итераций (от 100 до 190) требуется для уравнений замыкания k - ω SST модели турбулентности во время процесса впуска. Для расчета термодинамических показателей рабочего процесса двигателя, определяемых уравнением энергии, требуется наименьшее количество итераций (от 10 до 35). Расчет газодинамических характеристик вихревого потока в цилиндре двигателя, определяемых уравнениями Навье – Стокса, требует от 40 до 70 итераций.

3. Изучено влияние формы камеры сгорания поршневого двигателя и УПКВ на газодинамические характеристики воздушного вихря, т. е. на среднюю и пульсационную скорость потока, интенсивность турбулентности, форму закрутки вихря и масштаб турбулентности Колмогорова. Предложена формула для расчета диаметра воздушного вихря в зависимости от конструкции камеры сгорания. Выявлено, что степень влияния формы днища поршня на газодинамические характеристики зависит от УПКВ: чем ближе поршень к ВМТ, тем сильнее влияние.

4. Показано, что для всех используемых в работе конструкций поршней при приближении поршня к ВМТ наблюдается пик интенсивности турбулентности и минимум значений масштаба Колмогорова. Следовательно, в этот момент влияние турбулентности на процесс сгорания будет максимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. — EDN YTXYEP. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
2. Heywood J. Internal combustion engine fundamentals / J. Heywood. — New-York: McGraw-Hill Education, 2018. — 1721 p.
3. Галиев И. Р. О влиянии характеристик турбулентности на скорость распространения и ширину пламени / И. Р. Галиев // Двигателестроение. — 2023. — № 4(294). — С. 32–41. — EDN GTGVSB. DOI: 10.18698/jec.2023.4.32-41.
4. Гаврилов В. В. Согласование конструктивных и регулировочных параметров дизеля на основе анализа внутрицилиндровых процессов / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, В. И. Захаров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1300–1309. — EDN YLUFEN. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1300-1309.
5. 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. — EDN IWWMMN.
6. 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. — EDN RRSEXY. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.
7. Kim D. Effects of spray pattern and piston shape on in-cylinder flow in a two-cylinder spray-guided gasoline direct-injection optical engine / D. Kim, J. Shin, J. Kim, J. Park, Y. Son, S. Park // Applied Thermal Engineering. — 2023. — Vol. 234. — Pp. 121272. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121272.
8. Akar F. Numerical investigation of in-cylinder gas motion dynamics in a heavy-duty direct injection hydrogen internal combustion engine / F. Akar, O. Özener // International Journal of Hydrogen Energy. — 2024. — Vol. 86. — Pp. 730–741. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.338.
9. 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. — EDN WBKCEP. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-166-173.
10. Кулешов И. И. Экспериментальное обоснование выбора размера конечного элемента при расчете головок поршней / И. И. Кулешов, В. М. Ходаковский // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 603–611. — EDN YTXYFJ. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-603-611.

11. *Doppalapudi A. T.* Analysis of Improved In-Cylinder Combustion Characteristics with Chamber Modifications of the Diesel Engine / A. T. Doppalapudi, A. K. Azad, M. M. K. Khan // *Energies*. — 2023. — Vol. 16. — Is. 6. DOI: 10.3390/en16062586.
12. *Johansson B.* Combustion Chambers for Natural Gas SI Engines Part I: Fluid Flow and Combustion / B. Johansson, K. Olsson // International Congress & Exposition — SAE International, 1995. DOI: 10.4271/950469.
13. *Baccouch M.* Computational Fluid Dynamics — Analysis, Simulations, and Applications / M. Baccouch. — IntechOpen, 2025. — 244 p. DOI:10.5772/intechopen.1003390.
14. *Harshavardhan B.* Effect of piston shape on in-cylinder flows and air–fuel interaction in a direct injection spark ignition engine — A CFD analysis / B. Harshavardhan, JM. Mallikarjuna // *Energy*. — 2015. — Vol. 81. — Pp. 361–372. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.049.
15. *Pham V. C.* Effects of Piston Bowl Geometry on Combustion and Emissions of a Four-Stroke Heavy-Duty Diesel Marine Engine / V. C. Pham, J. K. Kim, W-J. Lee, S-J. Choe, V. V. Le, J-H. Choi // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12. — Is. 24. DOI: 10.3390/app122413012.
16. *Danciu B. A.* Analysis of in-cylinder flow structures and turbulence in a laboratory scale engine using direct numerical simulations / B. A. Danciu, G. K. Giannakopoulos, M. Bode, C. E. Frouzakis // *Physics of Fluids*. — 2025. — T. 37. — № 9. — C. 095191. DOI: 10.1063/5.0267238.
17. *Doosje E.* Limits of mixture dilution in gas engines: Phd Thesis; specialty: Mechanical Engineering / E. Doosje. — Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010. — 217 p. DOI: 10.6100/IR684884.
18. *Yavuz I.* Refined Turbulence Models for Simulation of IC-Engine Cylinder Flows Phd Thesis; specialty: Mechanical and Aerospace Engineering / Yavuz I. — West Virginia University. — 2000. — 312 p. DOI: 10.33915/etd.2309.

REFERENCES

1. Zhivlyuk, G. E. and A. P. Petrov. “Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
2. Heywood, J. *Internal combustion engine fundamentals*. New-York: McGraw-Hill Education, 2018.
3. Galiev, I. R. “On the impact of turbulence characteristics on the flame propagation speed and width.” *Engines Construction* 4(294) (2023): 32–41. DOI: 10.18698/jec.2023.4.32-41.
4. Gavrilov, V. V., V. Yu. Maschenko and V. I. Zakharov. “Harmonization of the constructive and controllable parameters of the diesel engine on the basis of the analysis of the processes in the cylinder.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1300–1309. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1300-1309.
5. Kavtaradze, R.Z. “Development of combustion theory in Bauman technical university: from Grinevetsky method to modern 3D-models (continuation).” *Engine construction*. 1 (2020): 3–9.
6. Vatolin, D. 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.
7. Kim, D., S. Park et al. “Effects of spray pattern and piston shape on in-cylinder flow in a two-cylinder spray-guided gasoline direct-injection optical engine.” *Applied Thermal Engineering* 234 (2023): 121272. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121272.
8. Akar, F. and O. Özener. “Numerical investigation of in-cylinder gas motion dynamics in a heavy-duty direct injection hydrogen internal combustion engine.” *International Journal of Hydrogen Energy* 86 (2024): 730–741. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.338.
9. Ivanchenko, A. A., I. A. Schennikov and A. A. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-166-173.
10. Kuleshov, I. I. and V. M. Khodakovskiy. “Experimental rationale for the election size of the finite element in the calculation of the piston crowns.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 603–611. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-603-611.
11. Doppalapudi, A. T., A. K. Azad and M. M. K. Khan. “Analysis of Improved In-Cylinder Combustion Characteristics with Chamber Modifications of the Diesel Engine.” *Energies* 16.6 (2023). DOI: 10.3390/en16062586.

12. Johansson, B. and K. Olsson. "Combustion Chambers for Natural Gas SI Engines Part I: Fluid Flow and Combustion." *International Congress & Exposition*. SAE International, 1995. DOI: 10.4271/950469.
13. Baccouch, M. *Computational Fluid Dynamics — Analysis, Simulations, and Applications*. IntechOpen, 2025. DOI:10.5772/intechopen.1003390.
14. Harshavardhan B. Effect of piston shape on in-cylinder flows and air–fuel interaction in a direct injection spark ignition engine — A CFD analysis / B. Harshavardhan, JM. Mallikarjuna // *Energy*. — 2015. — Vol. 81. — Pp. 361–372. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.049.
15. Pham, V. C., J-H. Choi et al. "Effects of Piston Bowl Geometry on Combustion and Emissions of a Four-Stroke Heavy-Duty Diesel Marine Engine." *Applied Sciences* 12.24 (2022). DOI: 10.3390/app122413012.
16. Danciu, B. A., G. K. Giannakopoulos, M. Bode and C. E. Frouzakis. "Analysis of in-cylinder flow structures and turbulence in a laboratory scale engine using direct numerical simulations." *Physics of Fluids* 37.9 (2025): 095191. DOI: 10.1063/5.0267238.
17. Doosje, E. Limits of mixture dilution in gas engines. PhD diss. Eindhoven, 2010.
18. Yavuz, I. Refined Turbulence Models for Simulation of IC-Engine Cylinder Flows. West Virginia University. 2000. DOI: 10.33915/etd.2309.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильдар Ринатович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»,
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, д. 3
e-mail: sbs777@yandex.ru
Новиков Денис Сергеевич — инженер
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»,
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, д. 3
e-mail: office@smtu.ru
Хлаинг Мьо Тхет — аспирант
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»,
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, д. 3
e-mail: hmtme@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ildar Rinatovich —
PhD in Technical Sciences
St. Petersburg State Marine
Technical University,
3, Lotsmanskaya St.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: sbs777@yandex.ru
Novikov Denis Sergeevich — Engineer
St. Petersburg State Marine
Technical University,
3, Lotsmanskaya St.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: office@smtu.ru
Hlaing Myo Thet — Postgraduate student
St. Petersburg State Marine
Technical University,
3, Lotsmanskaya St.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: hmtme@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 23 января 2026 г.
Received: Jan. 23, 2026.

ВЛИЯНИЕ НЕПРОВАРА НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ

Е. Д. Кожухарь, А. Р. Рубан

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

Темой работы является исследование влияния непровара на усталостную прочность судостроительной стали, так как в судостроении и судоремонте сварка играет основную роль при формировании соединений стальных конструкций. Отмечается, что при освидетельствовании проверяется техническое состояние и соответствие судна требованиям безопасности. Актуальность исследования обусловлена тем, что в ходе инспекции корпусных элементов судна, особенно сварных соединений, нередко обнаруживаются дефекты, характеризующиеся нарушением сплошности металла сварного шва, при этом их параметры выходят за рамки, установленные нормативными документами. Обращается внимание на то, что при превышении допустимых норм дефекты должны удаляться по технологии завода, а сварные швы переделываться. В предлагаемом исследовании рассмотрено влияние непровара на работоспособность сварного соединения при циклическом изгибе с вращением. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния непровара в сварном соединении на усталостную прочность. В качестве материала для проведения экспериментальных исследований использовалась судостроительная сталь РСД40. Для проведения усталостных испытаний образцы изготавливались в соответствии с ГОСТом 25.502–79^{1,2}. Представлена схема нагружения образца и выбран вид испытания на усталость. Проведена статистическая обработка результатов испытаний на основе пакета программ Minitab 18.1. Получены зависимости циклической долговечности от амплитуды напряжений. Проведен сравнительный анализ ограниченной выносливости сварных соединений, содержащих дефект, типа непровар с разной площадью и при различных амплитудах напряжений цикла.

Ключевые слова: судостроение, судостроительная сталь, сварка, дефекты сварки, непровар, усталостные испытания, изгиб с вращением, образцы, работоспособность, механические характеристики.

Для цитирования:

Кожухарь Е. Д. Влияние непровара на циклическую долговечность сварных соединений корпусных конструкций судов / Е. Д. Кожухарь, А. Р. Рубан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 297–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-297-305. — EDN MLJHBF.

INFLUENCE OF LACK OF FUSION ON THE FATIGUE LIFE OF WELDED JOINTS IN SHIP HULL STRUCTURES

E. D. Kozhukhar, A. R. Ruban

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The paper is devoted to the study of the effect of lack of fusion on the fatigue strength of shipbuilding steel, since welding plays a major role in the formation of joints of steel structures in shipbuilding and ship repair. It is noted that during inspection, the technical condition of the vessel and its compliance with safety requirements are assessed. The relevance of the study is due to the fact that during inspection of hull elements, especially welded joints, defects characterized by a violation of the continuity of the weld metal are often detected, while their parameters exceed the limits established by regulatory documents. It is emphasized that when permissible limits are exceeded, defects must be removed in accordance with the shipyard technology, and the welds must be redone. The study considers the effect of lack of fusion on the serviceability of welded joints under rotating bending conditions. An analysis of studies addressing the influence of defects on welded joints is carried out. The results of experimental studies of the effect of lack of fusion in welded joints on fatigue strength are presented. Shipbuilding steel RSD40 was used as the material for the experiments. For fatigue

¹ ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Введ. 1 янв. 1981 г. взамен ГОСТ 23026–78 и ГОСТ 2860–65.

² ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Введ. 1 янв. 1981 г. взамен ГОСТ 23026–78 и ГОСТ 2860–65.

testing, specimens were manufactured in accordance with GOST 25.502–79. The specimen loading scheme and the type of fatigue test are presented. Statistical processing of the test results was performed using the Minitab 18.1 software package. Dependences of fatigue life on stress amplitude were obtained. A comparative analysis of the fatigue strength of welded joints containing lack-of-fusion defects of different sizes under various stress amplitudes was carried out.

Keywords: shipbuilding, shipbuilding steel, welding, welding defects, lack of fusion, fatigue testing, rotating bending, specimens, serviceability, mechanical properties.

For citation:

Kozhukhar, Evgenii D. and A. R. Ruban. “Influence of lack of fusion on the fatigue life of welded joints in ship hull structures.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.2 (2026): 297–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-297-305.

Введение (Introduction)

Эксплуатационные свойства судокорпусных изделий зависят не только от химического состава и структуры металла, но и от присутствия в нем скрытых дефектов: пор, неметаллических включений, непроваров и расслоений. Такие дефекты могут возникнуть как при изготовлении изделий, так и при эксплуатации. Поэтому при постройке или во время ремонта корпуса судна большое внимание уделяется выявлению скрытых дефектов.

При проверке корпусных элементов, особенно сварных соединений, нередко обнаруживаются внутренние дефекты, размеры которых выходят за рамки, установленные нормативными документами. В судостроении и судоремонте дефекты сварных соединений регламентируются, в частности, правилами Российского морского регистра судоходства (РМРС). По РМРС допускаются поры и шлаковые включения определенного размера и протяженности. Такой тип дефекта, как непровар, не допускается для уровня качества В и С.

Выявленные внутренние дефекты в сварных соединениях, которые превышают максимальные допустимые значения по действующим нормам, подлежат исправлению. Устранение дефектных участков приводит к увеличению сроков ремонта, а также повышается трудоемкость и стоимость ремонта или постройки корпуса судна.

Актуальным является вопрос устранения обнаруженного дефекта и разработка процедур, позволяющих эксплуатировать конструкцию. В предлагаемой работе выполнены исследования, допускающие использование сварных соединений, имеющих внутренние дефекты, выходящие за рамки нормативно допустимых, с сохранением своей работоспособности и выполнением заданной функции.

Автор работы [1] отмечает, что прочность сварного соединения превосходит прочность основного металла на 15 %, а также, что при наличии технологического дефекта в сварном соединении общая прочность конструкции снижается в меньшей степени, чем при наличии такого же дефекта в основном металле. В работе [2] рассматривалось влияние дефекта типа пора на прочность сварных швов, изготовленных из судостроительной стали РСД32. Экспериментально установлено, что для сварных соединений с усилением шва суммарная площадь дефектов от 5–10 % оказывает незначительное влияние на прочность. Влияние дефектов становится заметным при относительной площади дефекта в продольном сечении 28 %, и 36,5 % — в поперечном.

В работе [3] сделан вывод о том, что влияние площади дефекта на свойства судостроительной стали проявляется по-разному в зависимости от типа нагрузки. Наиболее критичным значением, после которого влияние дефекта становится существенным, является 15 % относительной площади при циклическом нагружении. Существенное влияние на механические и эксплуатационные свойства сварного соединения при динамическом и статическом нагружении оказывают дефекты, площадь которых составляет 30 % и 35 % соответственно.

Авторами работы [4] доказано, что сочетание дефектов типа *непровар* и *подрез* является наиболее опасным. Также авторами работы было экспериментально установлено, что циклическая долговечность таких соединений уменьшается в 2,1–2,9 раз по сравнению с аналогичными соединениями, имеющими только один тип дефекта — *непровар* или *подрез*.

Влияние дефектов сварных соединений, образующихся при постройке и ремонте корпусных конструкций судов, на их рабочие параметры и прочностные свойства, изучено не в полной мере, в частности, при наличии дефекта типа непровар. Дальнейшие исследования вопроса влияния непровара в сварном соединении на долговечность судокорпусных конструкций необходимы для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации судов.

Целью работы является получение зависимости количества циклов до разрушения конструкции сварных соединений судостроительной стали PCD40 с непроваром от амплитуды напряжений цикла при разной площади дефектов, задачами — изготовление образцов для проведения усталостных испытаний, испытание образцов до разрушения и проведение сравнительного анализа полученных результатов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Специально разработанные для судостроения стали марок PCA, PCD, PCE представляют собой низколегированные и углеродистые стали, предназначенные для создания корпусов кораблей, судов и морских сооружений. Данные стали соответствуют требованиям российских классификационных обществ, таких как Морской и Речной регистры судоходства, и характеризуются особыми механическими характеристиками, химическим составом и показателями прочности. Испытания на усталость материалов проводят с целью определения заданных механических характеристик с помощью использования стандартных методик испытаний. Выбирая материал для изготовления требуемых деталей и элементов конструкций, проводят прочностные расчеты [5]. Для определения влияния непровара на сварное соединение проводилось экспериментальное исследование сварных соединений образцов, изготовленных из судостроительной стали PCD40. Размеры опасного сечения выбирались из критерия максимальной достоверности влияния дефектов на сварное соединение. Сварка проводилась электродами категории ЗУ40ННН в режимах, оптимальных для данного типа соединения.

Сварка пластин, размеры которых составляют $L \geq 350$ мм; $B \geq 250$ мм; $S \geq 18$ мм, производилась методом ручной электродуговой сварки плавящимся электродом, которая выполнялась в нижнем положении с X-образной разделкой кромок (рис. 1). Форма подготовки кромок выполнялась в соответствии с типом соединения С25 по ГОСТу 5264–80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры»³. Образцы для циклических усталостных испытаний определяли по ГОСТу 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость».

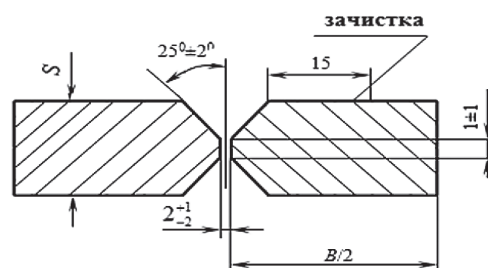


Рис. 1. Тип стыкового шва
Fig. 1. Type of butt weld

В результате токарных работ получились исходные образцы, эскиз которых представлен на рис. 2. Площадь опасного сечения образца в месте его разрушения от усталости составляла 78,5 мм². Усталостные испытания проводились на запатентованной установке (рис. 3), специально разработанной для испытаний [6]. В соответствии с принципом работы экспериментальной

³ ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. Взамен ГОСТ 5264–69. Изд. 2003 г.

установки при проведении экспериментов испытуемый образец подвергают изгибающему напряжению, возникающему в результате воздействия сил, показанных на рис. 4.

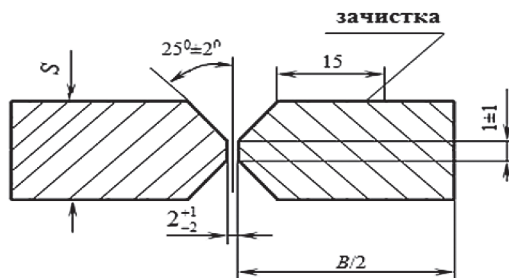


Рис. 2. Эскиз образца для испытаний
Fig. 2. Specimen sketch for testing

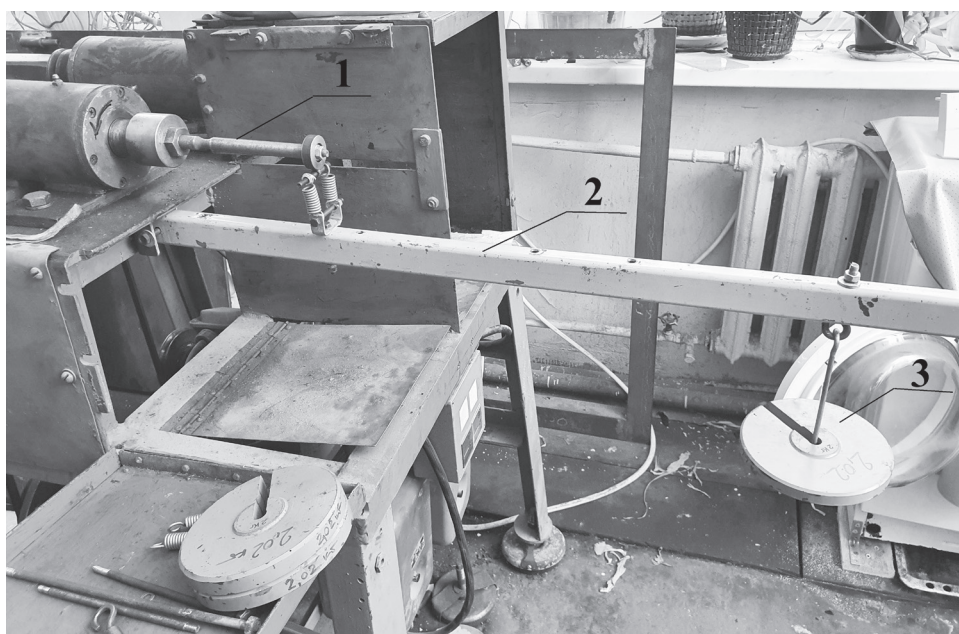


Рис. 3. Установка для проведения испытаний: 1 — образец; 2 — рычаг; 3 — груз
Fig. 3. Test setup: 1 — specimen; 2 — lever; 3 — weight

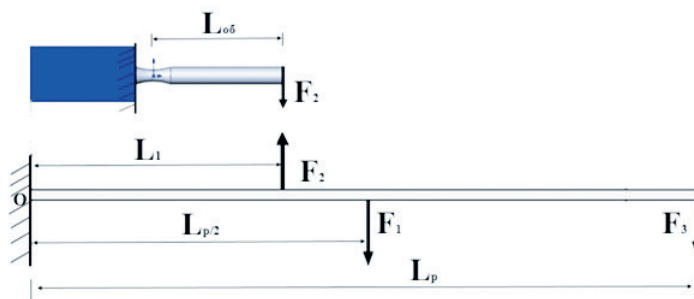


Рис. 4. Схема сил, оказывающих влияние на испытуемый образец
Fig. 4. Diagram of forces acting on the specimen

Силы, оказывающие влияние на образец:

F_1 — сила тяжести собственного веса рычага, Н;

F_2 — изгибающая сила на торце испытуемого образца, Н;

F_3 — сила тяжести подвешенного груза, Н.

Согласно основным законам сопротивления материалов, амплитуда изгибающего напряжения, действующего на образец, определяется по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{F_2 L_{об}}{W}, \quad (1)$$

где $L_{об}$ — расстояние от опасного сечения до точки приложения силы F_2 , $L_{об} = 115$ мм; W — момент сопротивления, m^3 , определяемый по формуле

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1d^3,$$

где d — диаметр опасного сечения круглого образца.

При этом изгибающая сила F_2 на торце испытуемого образца определяется исходя из того, что сумма моментов сил, представленных на рис. 3 относительно точки O , равна нулю:

$$\sum M_0 = 0;$$

$$F_2 L_1 - m_p g \frac{L_2}{2} - m_3 g L_2 = 0;$$

$$F_2 = \frac{m_p g \frac{L_2}{2} + m_3 g L_2}{L_1}, \quad (2)$$

где m_p — масса рычага, $m_p = 2$ кг; m_3 — масса подвешенного груза, кг; g — ускорение свободного падения; L_1 — длина от точки приложения сил F_2 до жесткой заделки (точка O), $L_1 = 190$ мм; L_2 — длина рычага, $L_2 = 795$ мм.

Испытание образцов на экспериментальной установке выполнялось при разных уровнях напряжений цикла нагружения путем приложения грузов разной массы ($m_r = 0,8; 2,7; 6,5$ кг) на торце рычага. В табл. 1 приведены результаты расчета максимального напряжения на образцы при проведении экспериментов с использованием формул (1) и (2).

Таблица 1

Максимальное напряжения цикла

Table 1

Maximum cycle stress

№ п/п.	Масса груза m_r , кг	Изгибающая сила F_2 , Н	Максимальное напряжение, МПа
1	0,8	74	85
2	2,7	152	175
3	6,5	308	355

Для оценки влияния непровара на усталостную прочность сварных соединений были испытаны три партии образцов (А, Б, В) с разной площадью дефекта: 46,08 мм², 36,8 мм², 13,17 мм² при уровнях напряжения 355 МПа, 175 МПа, 85 МПа.

Результаты (Results)

Результаты испытаний образцов приведены в табл. 2. Площадь дефектов вычислена по снимкам при помощи программных средств с учетом масштаба. Образцы, дефекты которых выходили на поверхность образца и были видимыми, не подвергались испытанию и исключались из исследования. Общее количество образцов, участвующих в эксперименте, составило 45 шт. Обработка полученных данных проводилась с применением стандартных методов, используемых в работах [7–10].

Таблица 2

Результаты экспериментальных образцов с различной площадью дефекта

Table 2

Results of experimental specimens with different defect areas

Образцы $S_{\text{деф}} = 46,08 \text{ мм}^2$ (58,7 % от площади опасного сечения)					
Площадь дефекта	Партия	Номер образца	Амплитуда напряжений, МПа	Число циклов до поломки N	lg N
$S_{\text{деф}} = 46,08 \text{ мм}^2$	A1	43	355	3076	3,49
		26		3368	3,53
		29		3217	3,51
		65		3685	3,57
		121		3312	3,52
	A2	46	175	16300	4,21
		92		15433	4,19
		88		15567	4,19
		44		15128	4,18
		23		15784	4,20
	A3	9	85	80257	4,90
		120		83109	4,92
		95		81578	4,91
		18		80577	4,91
		10		81365	4,91
Образцы $S_{\text{деф}} = 36,8 \text{ мм}^2$ (46,9 % от площади опасного сечения)					
$S_{\text{деф}} = 36,8 \text{ мм}^2$	Б1	1	355	8761	3,94
		3		8070	3,91
		6		8592	3,93
		87		8705	3,94
		94		8390	3,92
	Б2	7	175	34673	4,54
		140		37554	4,57
		89		33241	4,52
		4		36047	4,56
		5		32595	4,51
	Б3	45	85	150324	5,18
		2		154337	5,19
		90		151890	5,18
		140		155004	5,19
		89		151200	5,18
Образцы $S_{\text{деф}} = 13,17 \text{ мм}^2$ (16,8 % от площади опасного сечения)					
$S_{\text{деф}} = 13,17 \text{ мм}^2$	B1	24	355	14945	4,17
		19		13026	4,11
		91		13434	4,13
		142		12565	4,10
		122		10940	4,04
	B2	30	175	78200	4,89
		28		72987	4,86
		25		73377	4,87
		117		70951	4,85
		139		80446	4,91
	B3	138	85	797454	5,90
		117		719684	5,86
		118		762337	5,88
		161		768913	5,89
		143		703827	5,85

В результате выполнения регрессионного анализа в программе Minitab 18.1 математическое отношение между логарифмом количества циклов и ограниченным пределом выносливости имеет следующий вид:

- для $S_{\text{деф}} = 46,08 \text{ мм}^2$ $\lg \tilde{A} = 4,123 - 0,4472 \lg N$;
- для $S_{\text{деф}} = 36,8 \text{ мм}^2$ $\lg \sigma = 4,494 - 0,4951 \lg N$;
- для $S_{\text{деф}} = 13,17 \text{ мм}^2$ $\lg \tilde{A} = 3,977 - 0,3504 \lg N$.

В результате выполнения статистической обработки с доверительной вероятностью 0,95 на полученные данные обнаружилась значимость влияния уровня напряжения на количество циклов до разрушения. На рис. 5 приведены графики ограниченной выносливости и получены уравнения для партий А, Б, В.

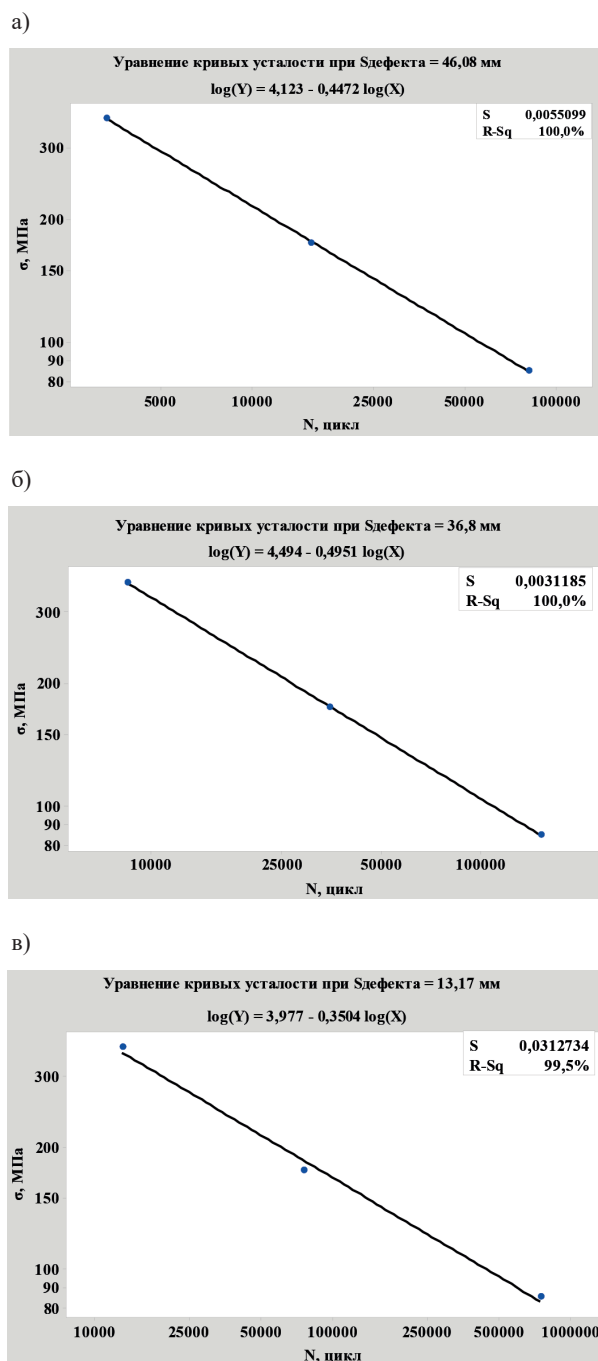


Рис. 5. Графическое представление уравнения кривой усталости:

а — партии А; б — партии Б; в — партии В

Fig. 5. Graphical representation of the fatigue curve equation:

(a) batch A; (b) batch B; (c) batch C

Полученные графики показывают зависимость количество циклов до разрушения конструкции сварных соединений с непроваром при разных уровнях напряжений и при разной площади дефектов.

Необходимо отметить, что полученные результаты лабораторных испытаний позволяют оценить усталостную долговечность сварных соединений с непроваром лабораторных образцов, изготовленных из судостроительной стали при определенном виде нагружения.

Выводы (Conclusions)

На основе выполненных экспериментальных исследований установлено следующее:

1. Наличие дефектов в сварном шве снижает прочность сварного соединения, локализация разрушения происходит в самом шве, несмотря на то что механические свойства материала сварного шва выше, чем основного металла.

2. Результаты исследования демонстрируют прямую зависимость: при снижении площади дефекта возрастает усталостная долговечность сварного шва с непроваром. При уровнях напряжения 355 МПа, 175 МПа, 85 МПа и уменьшении площади дефекта на 20 % число циклов увеличивается на 2,55, 2,23 и 1,87 раз соответственно, а при уменьшении площади дефекта на 71 % число циклов увеличивается на 3,89, 4,81 и 9,22 раз.

3. Результаты испытаний подтверждают влияние уровня напряжений на усталостную долговечность сварных соединений с непроваром. В образцах, которые испытывались на уровне напряжений, равных 85 МПа, зафиксировано самое большее влияние на среднее значение числа циклов до разрушения. Данный факт указывает на то, что при увеличении площади дефектов с 16,8 % до 58,7 % от площади опасного сечения образца сварной шов с непроваром более восприимчив к интенсивности протекания процесса усталости. Указанный характер зависимости позволит установить площадь «неопасного» с позиции усталостной долговечности площади непровара сварного шва судокорпусной конструкции.

4. Всестороннее изучение рассмотренной проблемы позволит установить степень влияния непровара на усталостную прочность сварных швов судостроительной стали. Понимание фактической опасности от непровара дает возможность пересмотреть нормативные документы без ущерба для безопасности. Результатом станет оптимизация производственных процессов, сокращение трудозатрат и снижение расходов на материалы при строительстве и ремонте судовых конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насонов В. А. Оценка допустимости эксплуатации сосудов давления с дефектами сварных соединений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: специальность 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии» / В. А. Насонов. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 125 с. — EDN ZPRIRH.

2. Нгуен З. Л. Влияние нетрещиноподобных дефектов на механические свойства сварных соединений корпусов судов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.08.04 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства» / З. Л. Нгуен. — Астрахань: АГТУ, 2021. — 163 с. — EDN NERUVW.

3. Нгуен Н. Обоснование допустимой площади внутренних дефектов сварки при постройке и ремонте наружной обшивки стальных корпусов судов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.08.04 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства» / Н. Нгуен. Астрахань: АГТУ, 2016. — 124 с.

4. Рафиков С. К. Оценка прочности и надежности сварных соединений трубопроводов сжиженного газа и конденсата / С. К. Рафиков, Г. С. Шарнина // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2022. — № 12(132). — С. 44–47. — EDN QXRLPJ.

5. Gadolina I. V. Varied approaches to loading assessment in fatigue studies / I. V. Gadolina, N. A. Makhutov, A. V. Erpalov // International Journal of Fatigue. — 2021. — Vol. 144. — Pp. 106035. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106035.

6. Пат. 2790337 Российская Федерация МПК G01N 3/32 Установка для испытаний образцов на усталость / Е. Д. Кожухарь, А. Р. Рубан, В. В. Шахов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный технический университет, ФГБОУ ВО «АГТУ». — № 2022108243; заявл. 21.06.2021; опубл. 16.02.2023, Бюл. № 36. — 1 с. — EDN OXLCCM.

7. Мухамеджанова О. Г. Статистический анализ при проведении межлабораторных сличительных испытаний / О. Г. Мухамеджанова, Л. Р. Сатлыкова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2022. — № 2(40). — С. 110–115. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-40-2-110-115. — EDN ILVPMZ.

8. Данатаров Б. Сопротивление материалов: основы и применение / Б. Данатаров, Т. Ходжаева, А. Сапаралыева, Г. Эресцов // Инновационная наука. — 2024. — Т. 1. — № 12-1. — С. 135–137. — EDN FFUPOT.

9. Алсайд М. Обоснование применения многослойных композитных материалов в судостроении / М. Алсайд, А. Саламех // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 37–47. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-37-47. — EDN KIMNES.

10. Нгуен Н. Ограниченная выносливость дефектных сварных швов корпусных конструкций / Н. Нгуен // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 1. — С. 23–28. — EDN VNTNUD.

REFERENCE

1. Nasonov, V. A. Otsenka dopustimosti ekspluatatsii sosudov davleniya s defektami svarnykh soedineniy. PhD diss. Moskva, 2015.

2. Nguen, Z. L. Vliyanie netreschinopodobnykh defektov na mekhanicheskie svoystva svarnykh soedineniy korpusov sudov. PhD diss. Astrahan, 2021.

3. Nguyen, N. Obosnovanie dopustimoy ploshchadi vnutrennih defektov svarki pri postrojke i remonte naruzhnej obshivki stal'nykh korpusov sudov: PhD diss. Astrakhan, 2016.

4. Rafikov, S. K. and G. S. Sharnina. "Otsenka prochnosti i nadezhnosti svarnykh soedineniy truboprovodov szhizhennogo gaza i kondensata." *Business Magazine «Neftegaz.Ru»* 12(132) (2022): 44–47.

5. Gadolina, I. V., N. A. Makhutov and A. V. Erpalov. "Varied approaches to loading assessment in fatigue studies." *International Journal of Fatigue* 144 (2021): 106035. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106035.

6. Kozhukhar', E. D., A. R. Ruban and V. V. Shakhov. RU 2 790 337 C2, G 01 N 3/32. Ustanovka dlya ispytaniy obraztsov na ustalost'. Russian Federation, assignee. Publ. February 16, 2023.

7. Mukhamedzhanova, O. G. and L. R. Satlykova. "Statistical analysis during interlaboratory comparison tests." *Engineering and Construction Bulletin of The Caspian Region* 2(40) (2022): 110–115. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-40-2-110-115.

8. Danatarov, B., T. Khodzhaeva, A. Saparalyeva and G. Ereschov. "Strength of materials: basics and applications." *Innovation Science* 1.12-1 (2024): 135–137.

9. Alsaid, M. and A. Salamekh. "Justification of using multilayer composite materials in shipbuilding." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2019): 37–47. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-37-47.

10. Nguen, N. "Limited durability of defect welding joints of the hull structures." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2016): 23–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кожухарь Евгений Дмитриевич — аспирант
Астраханский государственный технический
университет
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: kozhuhare@gmail.com

Рубан Анатолий Рашидович —
кандидат технических наук, доцент
Астраханский государственный технический
университет
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kozhukhar, Evgenii D. — Postgraduate student
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: kozhuhare@gmail.com

Ruban, Anatoly R. —
PhD in Technical Sciences, Assistant Professor
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 21 января 2026 г.
Received: Jan. 21, 2026.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВУЮ ГРУППУ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

В. А. Чанчиков, И. Н. Гужвенко, М. С. Прямухина

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

В работе представлены результаты исследований модифицированных смазочных материалов, предназначенных для эксплуатации в цилиндропоршневой группе судовых среднеоборотных дизелей. Объектом изучения является противоизносная присадка, содержащая фуллереновые кластеры C_{60} и C_{70} , а также легированный марганцем оксид железа Fe_3O_4 в среде олеиновой кислоты, предотвращающей агломерацию наночастиц и выпадение осадка. Испытания проводились на специализированной установке, оснащенной генератором магнитного поля, моделирующей возвратно-поступательное движение поршня, выполненного из серого чугуна. Длительность каждого цикла составила 1000 ч непрерывной работы. Основными переменными параметрами выступали контактное давление (0,5–1,5 МПа) и наличие внешнего магнитного поля в зоне трения. Выполнено сравнение показателей массового и линейного износа для базового циркуляционного масла, композиции с присадкой без наложенного магнитного поля и композиции с наложенным магнитным полем. Экспериментальные данные продемонстрировали, что введение присадки существенно повышает износостойкость сопряжения по сравнению с базовым маслом благодаря предположительно формированию металлофуллереновой пленки. Применение внешнего магнитного поля привело к ухудшению трибологических характеристик, что объясняется концентрацией ферромагнитных продуктов износа в зоне реверсирования поршня, действующих как абразив. Максимальное снижение интенсивности изнашивания зафиксировано без магнитного поля при давлении 1,0–1,5 МПа, что соответствует 11-му классу износостойкости. При наличии магнитного поля показатель снижается до 10-го класса. Присадка является эффективной как модификатор трения без магнитной активации, так как она формирует защитную пленку на поверхности деталей цилиндропоршневой группы, обеспечивая ресурс до капитального ремонта. Установлено, что весовой износ при оптимальных условиях значительно снижается, что подтверждает высокую эффективность разработки для современного морского транспорта.

Ключевые слова: противоизносная присадка, смазочное масло, судовой дизель, цилиндропоршневая группа, легирование марганца, олеиновая кислота, фуллереновые кластеры, слоистый модификатор, напряженность магнитного поля, машина трения.

Для цитирования:

Чанчиков В. А. Исследование противоизносных свойств модифицированных смазочных материалов в условиях, моделирующих цилиндропоршневую группу судового дизеля / В. А. Чанчиков, И. Н. Гужвенко, М. С. Прямухина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 306–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-306-317. — EDN MXLLCJ.

RESEARCH OF ANTI-WEAR PROPERTIES OF MODIFIED LUBRICANTS UNDER CONDITIONS SIMULATING THE CYLINDER–PISTON GROUP OF A MARINE DIESEL ENGINE

V. A. Chanchikov, I. N. Guzhvenko, M. S. Pryamukhina

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Astrakhan State Technical University”, Astrakhan, Russian Federation

The paper presents the results of studies of modified lubricants intended for operation in the cylinder–piston group of medium-speed marine diesel engines. The object of the study is an anti-wear additive containing

fullerene clusters C60 and C70, as well as iron oxide Fe₃O₄ doped with manganese in an oleic acid medium, which prevents agglomeration of nanoparticles and precipitation. The tests were carried out on a specialized test rig equipped with a magnetic field generator simulating the reciprocating motion of a piston made of gray cast iron. The duration of each cycle was 1000 hours of continuous operation. The main variable parameters were contact pressure (0.5–1.5 MPa) and the presence of an external magnetic field in the friction zone. Mass and linear wear were compared for the base circulating oil, the composition with an additive without an applied magnetic field, and the composition with an applied magnetic field. The experimental data demonstrate that the introduction of the additive significantly increases the wear resistance of the friction pair compared to the base oil, presumably due to the formation of a metal–fullerene film. The application of an external magnetic field led to deterioration of tribological characteristics, which is explained by the concentration of ferromagnetic wear products in the piston reversal zone acting as an abrasive. The maximum reduction in wear rate was observed without a magnetic field at pressures of 1.0–1.5 MPa, which corresponds to wear resistance class 11. In the presence of a magnetic field, the indicator decreases to class 10. The additive is effective as a friction modifier without magnetic activation, as it forms a protective film on the surface of parts of the cylinder–piston group, ensuring service life up to major overhaul. It has been established that mass wear under optimal conditions is significantly reduced, which confirms the high efficiency of the development for modern maritime transport.

Key words: anti-wear additive, lubricating oil, marine diesel engine, cylinder–piston group, manganese doping, oleic acid, fullerene clusters, layered modifier, magnetic field strength, friction testing machine.

For citation:

Chanchikov, Vasilij A., I. N. Guzhvenko and M. S. Pryamukhina. “Research of the anti-wear properties of modified lubricants under conditions simulating the cylinder-piston group of a marine diesel engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 306–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-306-317.

Введение (Introduction)

Судовые среднеоборотные дизели (ССД) тронкового типа работают в широком диапазоне нагрузок и угловых скоростей вращения коленчатого вала. Среди основных трибологически значимых деталей и узлов, определяющих ресурс ССД до капитального ремонта, следует выделить прежде всего цилиндропоршневую группу (ЦПГ) и кривошипно-шатунный механизм (КШМ). Различия в смазке этих узлов трения состоят в режимах подачи смазочного материала в зону трения.

Для подвижных и неподвижных деталей ЦПГ характерным является режим смазки при разбрызгивании циркуляционного масла на стенку цилиндра, что вызывает неизбежные потери смазочного материала вблизи верхних и нижних мертвых точек. Между тем коренные и шатунные подшипники скольжения КШМ смазываются в более благоприятных гидродинамических режимах, в которых недостаток жидкого смазочного слоя присущ исключительно для переходных режимов работы, когда шейки постоянно направлены в одну сторону вращения коленчатого вала незначительно подняты слоем масла над сопрягаемыми подшипниковыми вкладышами. Таким образом, в зоне верхней мертвой точки всегда наблюдается дефицит смазочного масла, что способствует возникновению условий для полусухого трения. Это вызвано рядом причин, связанных не только с механизмом возвратно-поступательного движения, но и с высокими контактными давлениями, локальными температурами деталей ЦПГ и прорывом рабочих газов.

Повышения смазочной способности моторных масел и существенного снижения интенсивности изнашивания деталей ЦПГ ССД можно достигнуть путем применения различных способов и материалов. Эффективным решением данной проблемы является целенаправленное включение в состав базового смазочного материала специализированных противоизносных присадок (ПП), функциональная активность которых способна реализовываться через различные механизмы триботехнического воздействия. Так, например, фундаментальный механизм их работы может базироваться на использовании различных способов активации твердофазных или химически активных компонентов присадок непосредственно в зоне контактного трения, где формируются экстремальные значения давления, температуры и градиентов скоростей деформации.

Следует отметить, что при этом не исключена возможность заполнения микронеровностей и дефектов поверхностного слоя трущихся деталей тончайшими (наноразмерными) слоями действующих компонентов присадки [1]. В данном случае присадка функционирует как слоистый

модификатор трения, ее активные частицы (например, дисульфид молибдена, графит, слоистые силикаты или полимерные композиции) адсорбируются на металлических поверхностях, формируя прочные, но легко сдвигаемые граничные пленки [2–4]. Такие пленки не только снижают коэффициент трения, но и предотвращают прямой металлический контакт, минимизируя адгезионное и абразивное изнашивание, а также способствуют более равномерному распределению контактных нагрузок по площади сопряжения [5, 6].

Альтернативный механизм основан на предварительном избирательном разрушении наиболее изношенных или деформированных микронеровностей поверхности трения с последующим формированием на этих участках новых, более износостойких защитных микроструктур [7, 8]. Данный подход реализуется, в частности, при использовании минеральных модификаторов трения (например, на основе серпентинитов, талька или других слоистых алюмосиликатов), а также фуллереновых и углерод-нанотрубочных композиций [9–11]. Под воздействием нагрузок и локального нагрева такие частицы способны инициировать процессы трибохимических реакций, рекристаллизации поверхностного слоя или формирования металл-полимерных композитных структур с повышенной твердостью и усталостной прочностью, что в совокупности обеспечивает эффект «самовосстановления» поверхности.

Перспективным направлением является применение методов внешнего физического воздействия на компоненты присадки в зоне трения с целью усиления их функциональной активности. К числу таких методов относятся, в частности, использование постоянного или импульсного магнитного поля, а также ультразвукового излучения [12–14]. Например, магнитная активация может способствовать более равномерному распределению магниточувствительных частиц присадки в объеме масла и их ориентации в зоне трибоконтакта, а ультразвуковое воздействие может интенсифицировать процессы диспергирования агрегированных частиц и ускорять доставку активных компонентов к поверхностям трения. Комбинирование химической природы присадок с физическими методами активации предоставляет возможность для создания адаптивных смазочных систем, способных динамически подстраиваться под изменяющиеся режимы эксплуатации судовых дизелей.

Воздействие магнитным полем на магнитоуправляемые компоненты ПП при наличии стабилизатора (олеиновой кислоты) дает возможность сосредоточить необходимое количество частиц присадки в конкретных зонах трения ЦПГ. При этом для генерации магнитного поля подходят как магнитные излучатели (МИ) переменного поля (напряженность магнитного поля может изменяться), так и постоянные магниты (тонкие пластины, магнитопласты), устанавливаемые в специальные места на неподвижных деталях ЦПГ (например, на внешней поверхности цилиндровой втулки). Выбор неподвижной детали для размещения МИ определен требованиями к минимальному изменению конструкции элементов ЦПГ ССД.

Целью исследования является оценка противоизносных свойств присадки, содержащей ферромагнитный компонент в условиях наложения внешнего магнитного поля. Модельным узлом трения в работе выбран ЦПГ ССД.

Методы и материалы (Methods and materials)

Постановка цели исследования (Statement of the research problem). Разработанная противоизносная присадка имеет состав, включающий фуллереновые модификаторы C_{60} и C_{70} (до 14 % масс.), легированный марганцем магнетит $MnFe_2O_4$ (до 14,9 % масс.), а также олеиновую кислоту $C_{18}H_{34}O_2$, предотвращающую слияние мицелл присадки в крупные агломераты. Олеиновая кислота предотвращает образование крупных агломератов наночастиц присадки и таким образом препятствует преждевременному выпадению в осадок твердой составляющей присадки при ее долговременном хранении.

Дисперсность порошков $MnFe_2O_4$ и фуллереновых наноразмерных модификаторов C_{60} и C_{70} в диапазоне 10^{-7} – 10^{-8} м способствует предотвращению загрязнения фильтрующих элементов системы смазки ССД. Наличие в составе присадки [15] полиэдрических кластеров углерода дает возможность создать на металлической поверхности ЦПГ тончайшую металлофуллереновую

пленку, выполняющую защитные функции при трении поршня и поршневого кольца по цилиндровой втулке. Также следует отметить указанные в [15] положительные триботехнические свойства при наведении магнитного поля напряженностью $H = 15 \text{ кА/м}$ в зону трения.

Улучшению триботехнических свойств смазочной композиции «масло + присадка» при наличии в зоне трения сосредоточенного внешнего магнитного поля, согласно [15], способствует наличие легированного марганцем магнетита MnFe_2O_4 . Представленные в [15] результаты получены в нетипичных для работы ЦПГ условиях вращательного однонаправленного движения на машине трения СМТ-1 (пара трения: баббит Б83 – сталь 35).

Для узла трения, совершающего возвратно-поступательное движение, важным фактором при размещении на внешней поверхности цилиндровой втулки источника магнитного поля может оказаться скопление мелкогабаритных металлических загрязнений, постоянно присутствующих в циркуляционном смазочном масле ССД, что может минимизировать положительный триботехнический эффект присадки [15] в смазочном масле при умеренных объемных концентрациях (0,5–2,0 %). Поэтому необходимо выполнить оценку смазочной эффективности рассматриваемой противоизносной присадки в условиях работы ЦПГ ССД при наличии и отсутствии наложенного магнитного поля.

Характеристика исследовательской установки (Research setup characteristics). Противоизносные свойства проверялись для узла трения, моделирующего ЦПГ ССД, с чугунными цилиндровой втулкой и поршневым кольцом. Подобие модельной пары трения с ЦПГ реального ССД модели 6ЧН18/22 выполнялось в соответствии с пропорциональным уменьшением диаметральных размеров деталей и их конструктивными материалами (серыми чугунами).

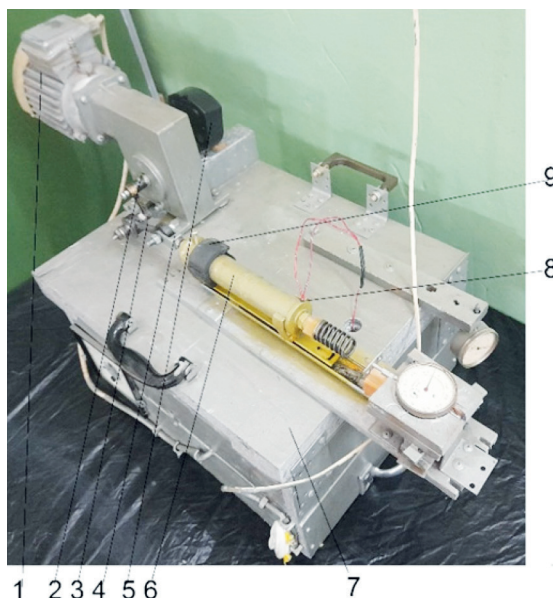


Рис. 1. Внешний вид исследовательской установки:

- 1 — мотор-редуктор; 2 — кривошип; 3 — шатун; 4 — крейцкопфный узел;
5 — счетчик двойных ходов; 6 — цилиндр; 7 — основной агрегатный короб;
8 — вход электрических проводов; 9 — постоянный магнит

Fig. 1. General view of the experimental setup:

- 1 — gear motor; 2 — crank; 3 — connecting rod; 4 — crosshead assembly;
5 — double-stroke counter; 6 — cylinder; 7 — main unit housing;
8 — electrical cable inlet; 9 — permanent magnet

Модельная пара трения располагалась на оригинальной исследовательской установке [15] при обеспечении ее возвратно-поступательного движения (рис. 1). От мотора-редуктора 1 червячно-го типа с двусторонним выходом вращающего момента получают вращение кривошип 2 и счетчик двойных ходов 5 индукционного типа. Последний производит счет числа вращательных движений

кривошипа 2, а, следовательно, и двойных ходов КШМ, который приводится в движение кривошипом. КШМ исследовательской установки состоит из шатуна 3, с одной стороны, соединенного шарнирно с кривошипом 2, а с другой стороны — с крейцкопфным узлом 4, приводящим в возвратно-поступательное движение шток с поршнем, расположенным внутри цилиндра 6, который укреплен неподвижно на основном агрегатном коробе 7).

ЦПГ исследовательской установки (рис. 2) состоит из штока 1, шарнирно соединенного с крейцкопфным узлом установки. Шток 1 жестко соединен с цилиндрическим поршнем 2. От крейцкопфа поршень 2 с двумя закрепленными на нем полусегментными кольцами 3 получает возвратно-поступательное движение. Сегменты кольца 3 непосредственно соприкасаются со сменным цилиндром 4 и истираются об него. Контактное давление P в требуемом диапазоне значений сегментов кольца о стенку цилиндра создается комплектом сменных пружин сжатия, расположенных в центральном канале поршня 1 перпендикулярно ходу его движения.



Рис. 2. Внешний вид сопряжения «поршень — цилиндр»:
1 — шток; 2 — поршень; 3 — сегменты кольца; 4 — сменный цилиндр
Fig. 2. General view of the “piston–cylinder” friction pair:
1 — rod; 2 — piston; 3 — ring segments; 4 — replaceable cylinder

Точное позиционирование штока 1 (см. рис. 2) в цилиндре выполняется благодаря его скольжению в крышке цилиндра 6 (см. рис. 1) с минимальным радиальным зазором. Цилиндр 4 (рис. 2) является внутренним и сменным по отношению к неподвижному цилиндру 6 (см. рис. 1), в начале которого установлен постоянный магнит 9, являющийся источником магнитного поля в данной исследовательской установке.

Между внутренним сменным цилиндром и внешним неподвижным цилиндром 6 (см. рис. 1) установлены нагревательные элементы для создания температуры внутреннего сменного цилиндра на уровне $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует тепловым нагрузкам цилиндровой втулки реального ССД. Вход электрических проводов 8 (см. рис. 1) для питания нагревательных элементов осуществляется с задней стороны цилиндра. Таким образом, в начале внутреннего цилиндра, где находится точка реверсирования хода поршня с сегментным кольцом, создается постоянное магнитное поле. При необходимости постоянный магнит 9 может быть удален, и указанная область цилиндра оказывается вне магнитного поля. Данное обстоятельство дает возможность проводить противоизносные испытания при истирании сегментов кольца о цилиндр при наличии и отсутствии магнитного поля в зоне трения.

Внешний вид экрана индицирования счетчика 5 (см. рис. 1) двойных ходов ЦПГ исследовательской установки приведен на рис. 3. Кнопкой 1 задаются параметры счета, кнопка 2 служит для сброса цифровых показателей на экране в начале работы ЦПГ установки, цифровые показания 3 являются временем непрерывного движения ЦПГ, цифровые показания 4 являются числом двойных ходов (полного оборота магнитного элемента на выходном валу редуктора вокруг отсчетной индукционной части счетчика).



Рис. 3. Внешний вид узлов управления
и цифрового индирования счетчика двойных ходов:
1, 2 — кнопки «Режим» и «Сброс»; 3, 4 — цифровые показания
Fig. 3. General view of control units
and digital display of the double-stroke counter:
1, 2 — “Mode” and “Reset” buttons; 3, 4 — digital readings

Технические характеристики машины трения приведены в табл. 1, основные условия противоизносных испытаний — в табл. 2.

Таблица 1

Основные технические характеристики возвратно-поступательной машины трения

Table 1

Main technical characteristics of the reciprocating friction machine

Наименование	Единица измерения	Значение
Диапазон нагрузок комплекта сменных пружин F	Н	150...450
Диапазон контактных давлений на поверхности кольцевого сегмента P	МПа	0,5...1,5
Шаг нагрузок для комплекта сменных пружин ΔF	Н	150±3
Шаг давлений на поверхности кольцевого сегмента ΔP	МПа	0,5±0,01
Число двойных ходов поршня за час работы n	—	1560
Время непрерывной работы за цикл испытания T	ч	1000
Радиус приводного кривошипа R	м	0,0368
Длина приводного шатуна L	м	0,088
Соотношение радиуса кривошипа — длины шатуна R/L	—	0,4182
Путь трения за цикл испытания S_t	м	114820
Диаметр испытательного цилиндра D	м	0,036
Толщина сегмента кольца в осевом направлении B	м	0,007
Контактная площадь кольцевого сегмента A	м ²	2,97·10 ⁻⁴
Внешний диаметр пружины D_v	мм	26,3
Диаметр витка пружины d_v	мм	2,7
Высота пружины без нагрузки/полностью сжатой H	мм	16,4/5,4
Индекс пружины i	—	9,75

Порядок проведения противоизносных испытаний смазочных материалов (Procedure for conducting anti-wear tests of lubricants). Смазочные материалы (см. табл. 1) испытываются на противоизносную способность на исследовательской установке в следующем порядке:

1. В каждом цикле испытания предоставляется три испытываемых образца: два оппозитно устанавливаемых на подвижный поршень чугунных сегмента поршневого кольца и один чугунный съемный цилиндр, помещаемый в основной цилиндр установки; образцы закрепляются на своих штатных местах расположения.

2. В основной цилиндр установки заливается жидкий смазочный материал, в соответствии с циклом испытания (табл. 2) в количестве не менее 25 см³.

3. Подвижный узел установки в виде кривошипного вала, шатуна и подвижного поршня в своей направляющей приводится в движение, которое с одинаковой частотой вращения кривошипного вала $n = 26$ об/мин поддерживается в течение временного отрезка $T = 1000$ ч или пути трения, совершаемого образцами $S_T = 114820$ м.

4. По истечению указанного времени и преодолению пути трения, контролируемого счетчиком, подвижный узел установки останавливается, из основного цилиндра извлекается испытанный, с поршня снимаются испытанные сегменты кольца.

5. Производится очистка испытанных образцов от остатков смазочного материала и продуктов износа, после чего следует проводить оценку их весового износа на весах с дискретностью 0,001 г.

Таблица 2

Параметры противоизносных испытаний

Table 2

Parameters of anti-wear tests

Наименование параметра	Объекты испытаний (смазочные материалы)		
Контактное давление P , МПа	Масло Б (базовое)	Масло МГ (базовое масло + присадка [15] — магнитное поле наложено)	Масло НМ (базовое масло + присадка [15] — магнитное поле отсутствует)
0,5	1*	2*	3*
1	4*	5*	6*
1,5	7*	8*	9*
Материал испытываемых образцов (подвижный кольцевой сегмент / неподвижный сменный цилиндр)	Серый легированный чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 3443–77) / серый чугун с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412–79)		
Шероховатость испытываемых образцов (подвижный / неподвижный), Ra	1,25 / 0,63		
Концентрация противоизносной присадки по объему смазочного масла С, %	1,0		
Базовое масло	Циркуляционное судовое масло М16Г2ЦС (ГОСТ 12337–2020)		
Коэрцитивная сила внешнего магнитного поля от постоянного МИ, Э	150		

*Номера этапов противоизносных испытаний.

Разработанные оборудование и методика проведения противоизносных испытаний модифицированных смазочных материалов позволяют оценить смазочную способность предлагаемых и перспективных присадок в условиях, моделирующих ЦППГ ССД. При этом минимизируется время проведения подобных испытаний, которые реализуются в достаточно широком диапазоне переменных параметров.

Обработка полученных значений противоизносных испытаний (*Processing of the obtained values of anti-wear tests*). В качестве оценочных показателей противоизносных свойств кольцевого сегмента и цилиндра на каждом цикле испытания выступают:

- линейный износ поверхности образца h_p , м;
- интенсивность изнашивания I_i .

Результаты противоизносных испытаний рассчитываются по следующим формулам:

1) линейный износ сегментного образца:

$$h_i = (\Delta m_i / \rho) / A, \quad (1)$$

где Δm_i — масса (г) изношенного металла за цикл испытания; $\rho = 7,87 \cdot 10^6$ г/м³ — плотность чугуна для образцов; $A = 2,97 \cdot 10^{-4}$ м² — площадь контурной поверхности трения на цилиндрической сегментной поверхности подвижного образца;

2) интенсивность изнашивания сегментного образца:

$$I_i = h_i / S_T, \quad (2)$$

где h_i — линейный износ подвижного сегментного образца, м; $S_T = 114820$ м — путь трения за цикл испытания.

Результаты (Results)

Результаты противоизносных испытаний на исследовательской установке для смазочных материалов (см. табл. 2) приведены в табл. 3–5. Указаны: потеря массы Δm_i в результате изнашивания образцов (табл. 3), линейный износ h_i образца (сегментное кольцо) — табл. 4, интенсивность изнашивания I_i для данного подвижного образца (табл. 5).

Таблица 3

Потеря массы Δm_i в результате изнашивания образцов, г

Table 3

Mass loss Δm_i as a result of specimen wear, g

Контактное давление P , МПа	Смазочный материал*		
	Масло МГ	Масло Б	Масло НМ
0,5	0,024	0,019	0,013
1	0,044	0,035	0,027
1,5	0,077	0,062	0,046

*Обозначения согласно принятым в табл. 2.

Таблица 4

Линейный износ h_i сегментного образца, м

Table 4

Linear wear h_i of the segment specimen, m

Контактное давление P , МПа	Смазочный материал*		
	Масло МГ	Масло Б	Масло НМ
0,5	$1,02679 \cdot 10^{-05}$	$8,129 \cdot 10^{-06}$	$5,562 \cdot 10^{-06}$
1	$1,88244 \cdot 10^{-05}$	$1,497 \cdot 10^{-05}$	$1,155 \cdot 10^{-05}$
1,5	$3,29427 \cdot 10^{-05}$	$2,653 \cdot 10^{-05}$	$1,968 \cdot 10^{-05}$

*Обозначения согласно принятым в табл. 2.

Таблица 5

Интенсивность изнашивания I_i сегментного образца

Table 5

Wear rate I_i of the segment specimen

Контактное давление P , МПа	Смазочный материал*		
	Масло МГ	Масло Б	Масло НМ
0,5	$4,47144 \cdot 10^{-11}$	$3,54 \cdot 10^{-11}$	$2,422 \cdot 10^{-11}$
1	$8,19764 \cdot 10^{-11}$	$6,521 \cdot 10^{-11}$	$5,03 \cdot 10^{-11}$
1,5	$1,43459 \cdot 10^{-10}$	$1,155 \cdot 10^{-10}$	$8,57 \cdot 10^{-11}$

*Обозначения согласно принятым в табл. 2.

Графические зависимости $\Delta m_i f(P)$ и $I_i f(P)$ приведены на рис. 4.

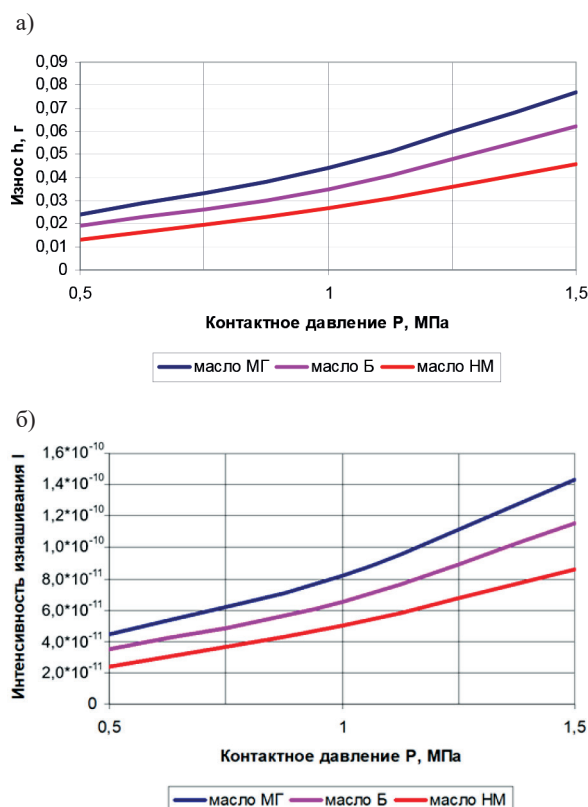


Рис. 4. Графическая зависимость:

а — износа материала от контактного давления $\Delta m_i f(P)$;

б — интенсивности изнашивания от контактного давления $I_i f(P)$

Fig. 4. Graphical relationships: (a) material wear versus contact pressure $\Delta m_i f(P)$;

(b) wear rate versus contact pressure $I_i f(P)$

Анализ полученных графиков дает представление о влиянии на трибологические процессы внешнего магнитного поля постоянного характера, которое ухудшает показатели износа модельного сопряжения в сравнении с отсутствием магнитного поля в зоне трения при использовании смазочной композиции. Сравнение результатов $\Delta m_i f(P)$ и $I_i f(P)$ между смазочной композицией с направленным магнитным полем и базовым маслом показывает меньшие показатели износа для последнего.

Выводы (Summary)

На основе результатов, полученных в результате проведенного исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Добавление противоизносной присадки [15] в циркуляционное судовое масло повышает износостойкость возвратно-поступательно движущейся ЦПГ ССД. Это показано по результатам оценки весового износа $\Delta m_i f(P)$ и интенсивности изнашивания $I_i f(P)$ испытанных образцов в среде базового масла и смазочной композиции с разработанной противоизносной присадкой. В настоящее время механизм защитного действия компонентов присадки на детали ЦПГ представляется как формирование тончайшей металлофуллереновой пленки, заполняющей микронеровности и субмикронеровности рельефа трущихся поверхностей.

2. Граничный режим трения и недостаток толщины смазочной пленки на модельных деталях, имитирующих ЦПГ ССД в исследовательской установке, создают условия для выделения в зону трения и смазочное масло продуктов износа — мелких металлических включений. При сравнении результатов весового износа и интенсивности изнашивания в среде смазочных композиций при на-

личии и отсутствии внешнего постоянного по величине магнитного поля последний вариант использования присадки в смазочном масле оказался более выгодным. Этот факт можно объяснить постепенным скоплением физических продуктов износа в зоне трения модельных образцов, выступающей в виде точки реверсирования хода поршня. Скоплением данных продуктов, преимущественно металлического и оксидного характера, способствует наличие внешнего магнитного поля в зоне трения испытанных чугуновых образцов; устранив его объем посторонних включений можно резко сократить, а следовательно, значительно снизить износ трибосопряжения.

3. Так же, как и внешнее магнитное поле постоянного характера ухудшает показатели износа модельного сопряжения в сравнении с отсутствием магнитного поля в зоне трения для смазочной композиции с присадкой [15]. Сравнение результатов $\Delta m_i f(P)$ и $I_i f(P)$ между смазочной композицией с направленным магнитным полем и базовым маслом показывает меньшие показатели износа для последнего. Это препятствует возможности применения указанной присадки в смазочном масле в режиме наведения внешнего магнитного поля.

4. Максимальное снижение износа в диапазоне создаваемых на модельный узел трения контактных давлений достигается при значениях $P = 1,0\text{--}1,5$ МПа, что говорит о реализуемых механизмах приработки компонентов присадки при значительных нагрузках на узел трения.

5. Достигнутые показатели интенсивности изнашивания $I_i f(P)$ испытанных образцов для всех используемых смазочных материалов находятся в допустимых классах износостойкости на уровне 11-го класса, характерного для ЦПГ ССД. Однако, для смазочных композиций с магнитными свойствами при внешнем направленном магнитном поле данный показатель ухудшается до 10-го класса, что не позволяет использовать присадку [15] в данных условиях как противоизносный компонент циркуляционного масла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перекрестов А. П.* Исследование эксплуатационных свойств противоизносных присадок для моторных смазочных масел в зависимости от процессов их обработки и седиментации / А. П. Перекрестов, А. Саламех, В. А. Чанчиков [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 64. — С. 110–123. — EDN UJZOKY. DOI: 10.37890/jwt.vi64.102.
2. *Марченко Е. А.* Использование диселенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения / Е. А. Марченко, Т. А. Лобова // Вестник научно-технического развития. — 2009. — Т. 5 (21). — С. 16–21.
3. *Буяновский И. А.* Применение мелкодисперсного диселенида вольфрама для улучшения трибологических характеристик масел и пластичных смазок / И. А. Буяновский, Т. А. Лобова, Е. А. Марченко, И. П. Чулков // Механизация строительства. — 2014. — № 5(839). — С. 11–14. — EDN SEDUAI.
4. *Пустовой И. Ф.* Применение технологии «Гелевая мультимодальная добавка FE-DO» для восстановления параметров работы судового оборудования / И. Ф. Пустовой, Д. С. Сорокин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 70–78. — EDN TGAEWL.
5. *Цветков Ю. Н.* Влияние высокодисперсных добавок в смазочные материалы на эффективность работы дизеля / Ю. Н. Цветков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5(27). — С. 19–25. — EDN SWLTMR.
6. *Harshavardhan B.* Effect of piston shape on in-cylinder flows and air–fuel interaction in a direct injection spark ignition engine — A CFD analysis / B. Harshavardhan, J. M. Mallikarjuna // Energy. — 2015. — Vol. 81. — Pp. 361–372. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.049.
7. *Долгополов К. Н.* Структура смазочных слоев, формирующихся при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения / К. Н. Долгополов, Д. Н. Любимов, А. Г. Пономаренко [и др.] // Трение и износ. — 2009. — Т. 30. — № 5. — С. 516–521. — EDN KYMVLB.
8. *Долгополов К. Н.* Влияние примесей магнетита на триботехнические свойства смазочных композиций, содержащих минеральные модификаторы трения / К. Н. Долгополов, Д. Н. Любимов, Е. А. Глазунова // Трение и износ. — 2011. — Т. 32. — № 2. — С. 143–149. — EDN NQTXCL.
9. *Дмитриченко Н. Ф.* Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C60 к моторному маслу / Н. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Микосянчик, А. И. Куц // Трение и износ. — 2009. — Т. 30. — № 6. — С. 550–555. — EDN KYMVNJ.

10. Muhammad H. S. Properties and tribological evaluation of graphene and fullerene nanoparticles as additives in oil lubrication / H. S. Muhammad, M. H. Sulaiman, S. Kamaruddin, A. H. Dahnel, N. F. H. Abd Halim, M. J. M. Ridzuan, M. A. Ahmad // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. — 2023. — Vol. 237. — Is. 8. — Pp. 1647–1656. DOI: 10.1177/13506501231175540.
11. Singh A. P. Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil — a review / A. P. Singh, R. K. Dwivedi, A. Suhane // *Materials Research Express*. — 2021. — Vol. 8. — Is. 10. — Pp. 102001. DOI: 10.1088/2053-1591/ac2add.
12. Аметов В. А. Влияние комбинированных воздействий на процессы в трибосопряжениях / В. А. Аметов, Ю. С. Саркисов, Е. Н. Спирин // *Химия и технология топлив и масел*. — 2004. — № 5(525). — С. 46–50. — EDN PHHJQF.
13. Sun L. Magnetic lubricants: Preparation, physical mechanism, and application / L. Sun, Y. Zhang, X. Cui, Q. An, Y. Chen, D. Jia, P. Gong, M. Liu, Y. S. Dambatta, C. Li // *Friction*. — 2025. — Vol. 13. — Is. 7. — Pp. 9441010. DOI: 10.26599/FRICT.2025.9441010.
14. Zhou G. Sliding tribological properties of 0.45 % carbon steel lubricated with Fe₃O₄ magnetic nanoparticle additives in baseoil / G. Zhou, Y. Zhu, X. Wang, M. Xia, Y. Zhang, H. Ding // *Wear*. — 2013. — Vol. 301. — Is. 1. — Pp. 753–757. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.027.
15. Пат. 2821108 Российская Федерация МПК C10M 125/10, C10M 169/04, C10N 30/06 противоизносная присадка / В. А. Чанчиков, И. Н. Гужвенко, А. А. Козлов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет». — № 2023132796; заявл. 12.12.2023; опубл. 17.06.2024, Бюл. № 17. — 5 с. — EDN DNT-MGT.

REFERENCES

1. Perekrestov, A. P., A. Salamekh, V. A. Chanchikov et al. “A study on operational properties of anti-wear additives for motor lubricating oils depending on their processing and sedimentation.” *Russian Journal of Water Transport* 64 (2020): 110–123. DOI: 10.37890/jwt.vi64.102.
2. Marchenko, E. A. and T. A. Lobova. “Ispol’zovanie diselenidov tugoplavkikh metallov dlya obespecheniya stabil’nosti raboty uzlov treniya.” *Vestnik Nauchno-Tekhnicheskogo Razvitiya* 5 (21) (2009): 16–21.
3. Buyanovskiy, I. A., T. A. Lobova, E. A. Marchenko and I. P. Chulkov. “The use of fine tungsten diselenide to improve the tribological properties of the lube oils and greases.” *Mekhanizatsiya stroitel’sstva* 5(839) (2014): 11–14.
4. Pustovoy, I. F. and D. S. Sorokin. “Application of “gel multimodal additive fe-do technology” for operation parameters restoration of shipboard machinery and equipment.” *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 74 (2024): 70–78.
5. Tsvetkov, Yu. N. “Vliyanie vysokodispersnykh dobavok v smazochnye materialy na effektivnost’ raboty dizelya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 19–25.
6. Harshavardhan, B. and J. M. Mallikarjuna. “Effect of piston shape on in-cylinder flows and air–fuel interaction in a direct injection spark ignition engine — A CFD analysis.” *Energy* 81 (2015): 361–372. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.049.
7. Dolgoplov, K. N., D. N. Lyubimov et al. “The structure of lubricating layers appearing during friction in the presence of additives of mineral friction modifiers.” *Journal of Friction and Wear* 30.5 (2009): 377–380. DOI: 10.3103/S1068366609050134.
8. Dolgoplov, K. N., D. N. Lyubimov and E. A. Glazunova. “The Effect of Magnetite Additives on the Triboengineering Properties of Lubricating Compositions Containing Mineral Friction Modifiers.” *Journal of Friction and Wear* 32.2 (2011): 101–106. DOI: 10.3103/S1068366611020048.
9. Dmitrichenko, N. F., R. G. Mnatsakanov, O. A. Mikosyanchik and A. I. Kushch. “Wear kinetics of contact surfaces with use of C₆₀ fullerene additive to motor oil.” *Journal of Friction and Wear* 30.6 (2009): 399–403. DOI: 10.3103/S106836660906004X.
10. Muhammad, H. S., M. H. Sulaiman, S. Kamaruddin et al. “Properties and tribological evaluation of graphene and fullerene nanoparticles as additives in oil lubrication.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 237.8 (2023): 1647–1656. DOI: 10.1177/13506501231175540.
11. Singh, A. P., R. K. Dwivedi and A. Suhane. “Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil — a review.” *Materials Research Express* 8.10 (2021): 102001. DOI: 10.1088/2053-1591/ac2add.

12. Ametov, V. A., Y. S. Sarkisov and E. N. Spirin. "Effect of combined effects on processes in tribocouples." *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 40.5 (2004): 333–341. DOI: 10.1023/B: CAFO.0000046268.59438.f9.
13. Sun, L., C. Li et al. "Magnetic lubricants: Preparation, physical mechanism, and application." *Friction* 13.7 (2025): 9441010. DOI: 10.26599/FRICT.2025.9441010.
14. Zhou, G., H. Ding et al. "Sliding tribological properties of 0.45 % carbon steel lubricated with Fe₃O₄ magnetic nano-particle additives in baseoil." *Wear* 301.1 (2013): 753–757. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.027.
15. Chanchikov, V. A., I. N. Guzhvenko, A. A. Kozlov et al. RU 2 821 108 C1, C 10 M 125/10C 10 M 169/04C 10 N 30/06. Protivoiznosnaya prisadka. Russian Federation, assignee. Publ. June 17, 2024.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чанчиков Василий Александрович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: bazelius87@mail.ru

Гужвенко Иван Николаевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: ivan.3123@yandex.ru

Прямухина Мария Сергеевна — ассистент
кафедры «Электрооборудование
и автоматика судов»
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: pryamuhina.masha@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chanchikov, Vasily A. — PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Shipbuilding and Marine Power Systems
Astrakhan State Technical University
16/1 Tatishchev Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: bazelius87@mail.ru

Guzhvenko, Ivan N. — PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of General
Engineering Disciplines and Land Transport
Astrakhan State Technical University
16/1 Tatishchev Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: ivan.3123@yandex.ru

Pryamukhina, Maria S. — Assistant
Professor of the Department
of Electrical Equipment
and Automation of Ships
Astrakhan State Technical University
16/1 Tatishchev Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: pryamuhina.masha@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 05 февраля 2026 г.
Received: Feb. 5, 2026.

ОБНОВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ КОРРОЗИИ МОРСКИХ СУДОВ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ВЫВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАМИЛЬТОНОВСКОГО МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

С. А. Огай, Ч. Т. Ле

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

Темой исследования является разработка достоверных моделей коррозии, имеющая решающее значение для точной оценки состояния конструкций, оптимизации графиков технического обслуживания, а также обеспечения безопасности и увеличения срока службы морских судов. Отмечается, что коррозия морских судов носит стохастический характер, и традиционные модели коррозии, как правило, определяются путем анализа достаточно обширных наборов данных о коррозии, собранных с различных судов во время плановых осмотров. При этом прямое применение традиционных моделей коррозии имеет ограничения, поскольку коррозия конкретного судна может отличаться от общей тенденции из-за специфических условий эксплуатации и окружающей среды. Поэтому в данном исследовании предлагается методология динамической калибровки традиционной модели коррозии на основе байесовского вывода (англ. Bayesian inference) и алгоритма выборки по методу Монте-Карло с Марковскими цепями (англ. Markov Chain Monte Carlo) — Гамильтоновский метод Монте-Карло (англ. Hamiltonian Monte Carlo) с использованием данных измерений остаточных толщин. После калибровки модели глубина коррозии для компонентов конкретного судна в различные моменты времени в течение срока эксплуатации прогнозируется с помощью моделирования Монте-Карло (англ. Monte Carlo Simulation). Предлагаемая методология позволяет учитывать погрешности измерений, пробелы в данных и, что наиболее важно, непрерывно обновлять параметры модели по мере поступления новых данных измерений остаточных толщин, тем самым повышая точность прогноза с течением времени. Ввиду отсутствия реальных данных измерений остаточных толщин в исследовании используются предполагаемые значения для судов, возраст которых составляет не менее 15 лет с целью моделирования «тяжелого» коррозионного сценария для настила верхней палубы балкера. Данное предположение основано на условиях эксплуатации балкеров в агрессивной морской коррозионной среде, что обеспечивает обобщаемость и соответствие наихудшему сценарию. Прогнозируемое значение средней глубины коррозии главной палубной плиты для судна, возраст которого составляет 15 лет, определенное с помощью откалиброванной модели, отклоняется от измеренных данных примерно на 10,87 %, что свидетельствует о приемлемой точности и подтверждает практическую применимость предложенной методологии для прогнозирования индивидуальной коррозии судна.

Ключевые слова: данные измерений, остаточная толщина, коррозия, морское судно, модель коррозии, глубины коррозии, байесовский вывод, Гамильтоновский метод Монте-Карло, моделирование методом Монте-Карло, метод Монте-Карло с марковскими цепями.

Для цитирования:

Огай С. А. Обновление моделей коррозии морских судов на основе байесовского вывода с использованием Гамильтоновского метода Монте-Карло / С. А. Огай, Ч. Т. Ле // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 318–334. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-318-334. — EDN QBYFIT.

BAYESIAN UPDATING OF CORROSION MODELS OF MARINE SHIPS USING HAMILTONIAN MONTE CARLO

S. A. Ogay, Tr. T. Le

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

The development of reliable corrosion models is crucial for accurate assessment of structural condition, optimization of maintenance schedules, and ensuring safety and extension of the service life of marine ships. It

is noted that corrosion of marine ships is stochastic in nature, and traditional corrosion models are typically established through the analysis of extensive corrosion datasets collected from various ships during routine surveys. However, the direct application of traditional corrosion models has limitations, as the corrosion of a specific ship may deviate from the general trend due to its specific operational and environmental conditions. Therefore, this study proposes a methodology for dynamic calibration of traditional corrosion models based on Bayesian inference and the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method, specifically the Hamiltonian Monte Carlo (HMC) method, using residual thickness measurement data. After calibration, corrosion depth for the components of a specific ship is predicted at various points during its service life using Monte Carlo simulation. The proposed methodology accounts for measurement uncertainties, data gaps, and continuously updates model parameters as new residual thickness data become available, thereby improving prediction accuracy over time. Due to the lack of real residual thickness measurement data, the study uses assumed values corresponding to a ship age of 15 years to simulate a severe corrosion scenario for the main deck plate of a bulk carrier. This assumption is based on operating conditions of bulk carriers in an aggressive marine environment and ensures consistency with a worst-case scenario. The predicted average corrosion depth of the main deck plate at 15 years, obtained using the calibrated model, deviates from the assumed data by approximately 10.87 %, indicating acceptable accuracy and confirming the applicability of the proposed methodology for predicting ship-specific corrosion.

Keywords: measurement data, residual thickness, corrosion, marine ships, corrosion model, corrosion depth, Bayesian inference, Hamiltonian Monte Carlo, Monte Carlo simulation, Markov Chain Monte Carlo.

For citation:

Ogay, Sergei A. and Tr. T. Le. "Bayesian updating of corrosion models of marine ships Hamiltonian Monte Carlo." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 318–334. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-318-334.

Введение (Introduction)

Морские суда в течение длительного времени работают в условиях коррозионно агрессивной морской среды с высокой влажностью. Коррозия является неизбежным явлением после ввода судна в эксплуатацию, и связанные с ней проблемы играют важную роль в обеспечении безопасности корпусных конструкций судна. Коррозионный износ существенно снижает общую и местную прочность корпусных конструкций, что создает риск тяжелых аварий и значительных экономических потерь [1]. Для предотвращения этих рисков необходимо разрабатывать модели коррозии, способные точно прогнозировать глубину коррозии во времени и оценивать степень ущерба от коррозионного износа (далее — коррозии). Следовательно, разработка достоверных моделей имеет решающее значение для точной оценки состояния конструкций, оптимизации графиков технического обслуживания, а также обеспечения безопасности и увеличения срока службы судов.

Исследование и развитие моделей коррозии осуществлялось от простых линейных до более сложных. С. R. Southwell и соавторы [2] предложили линейные и полулинейные модели для прогнозирования глубины коррозии во времени. Однако эти модели не учитывают влияние защитных покрытий, что приводит к завышенным оценкам глубины коррозии и чрезмерно консервативным результатам. В связи с этим R. E. Melchers [3] разработал стабильные тройные линейные модели и степенные модели для прогнозирования глубины коррозии, объясняющие нелинейные изменения скорости коррозии во времени, подчеркивая ведущую роль диффузии кислорода и активности анаэробных бактерий на различных стадиях коррозионного процесса. С. Guedes Soares и соавторы [4] предложили нелинейную модель, разделяющую процесс коррозии на три стадии: 1) отсутствие коррозии при наличии эффективного защитного покрытия; 2) нелинейный рост коррозии со временем после повреждения покрытия; 3) прекращение процесса деградации из-за образования продуктов коррозии на поверхности металла при достижении стабилизационной глубины коррозии.

Данная модель использовалась для прогнозирования глубины коррозии во времени для настила верхней палубы балластных и грузовых танков танкера [5] и данных замеров остаточных толщин, полученных Американским бюро судоходства (англ. *American Bureau of Shipping* (ABS)) [6]. S. Qin и соавторы [7] предложили аналогичную нелинейную модель, разделяющую процесс коррозии на три стадии: отсутствие коррозии при полной эффективности системы антикоррозионной защиты; нелинейное увеличение скорости коррозии в процессе образования и развития

питтингов; замедление коррозии вследствие формирования защитного слоя продуктов коррозии на металлической поверхности. М. В. Китаев и соавторы [8] предложили нелинейную модель, разделяющую процесс коррозии на две стадии: коррозия не возникает при целостности защитного покрытия; нелинейный рост скорости коррозии после повреждения целостности защитного покрытия. Эта модель применялась для прогнозирования глубины коррозии листов наружной обшивки в носовой части ледового пояса судна, работающего в Дальневосточном бассейне, с данными замеров остаточных толщин, собранными, обработанными и обобщенными в системе DEFHULL (англ. *Defects of Hulls*) [9]. Коэффициенты предложенных нелинейных моделей в исследованиях [4, 7, 8] оценивались с помощью метода наименьших квадратов.

Ограничения традиционных моделей коррозии часто приводят к их упрощению, и возможность существования других *кандидатных моделей* может быть упущена при выборе представительной модели. По этой причине в коррозионное моделирование был внедрен вероятностный подход. N. Yamamoto и соавторы [10, 11] исследовали деградацию защитных покрытий и коррозию корпусов, предложив вероятностную модель для описания этих явлений во времени. Процесс коррозии разделен на три последовательные стадии: 1) деградация защитного покрытия; 2) возникновение питтингов; 3) развитие питтингов. Для количественной оценки развития каждой стадии были введены простые вероятностные модели. Параметры каждой из них оценивались с помощью метода максимального правдоподобия. J. K. Paik и соавторы [12, 13] предложили вероятностную модель для прогнозирования скорости коррозии элементов продольных несущих конструкций балкеров и однокорпусных танкеров.

Процесс коррозии разделен на две последовательные стадии: 1) срок службы (долговечность) защитного покрытия моделируется случайной величиной, подчиненной нормальному распределению; 2) стадия развития коррозии после потери защитного покрытия описывается распределением Вейбулла. Статистические параметры распределения Вейбулла оценивались методом наименьших квадратов с использованием вероятностной бумаги распределения Вейбулла. S. Qin и соавторы [7] разработали новую вероятностную модель, представив параметры своей нелинейной модели как случайные величины с нормальным распределением; среднее значение и стандартное отклонение оценивались посредством минимизации функции ошибки для данных, симулирующих непрерывные измерения коррозии на образцах стальных пластин с защитными покрытиями, погруженных в морскую воду. J. K. Paik и соавторы [14, 15] модифицировали свою модель [12, 13], разделив процесс коррозии на три последовательные стадии: 1) срок службы (или долговечность) защитного покрытия моделируется случайной величиной, подчиненной логнормальному распределению; 2) переходная стадия между потерей защитного покрытия и инициацией коррозии описывается экспоненциальным распределением; 3) стадия развития коррозии.

Случайные параметры для стадии развития коррозии оценивались методами статистического анализа данных, собранных для элементов продольных несущих конструкций балкеров, однокорпусных и двухкорпусных танкеров. J. Guo и соавторы [16] предложили полувероятностную модель для оценки, зависящей от времени предельной прочности настила верхней палубы старых танкеров с учетом коррозии. В нелинейных формулах дано описание временной зависимости коррозионного износа через среднее значение и стандартное отклонение, а в зависящих от времени функциях плотности вероятности (ФПВ) — количественное описание неопределенностей. J. K. Paik и соавторы [17] предложили усовершенствованную пятишаговую методику разработки эмпирической модели с применением вероятностного подхода для описания коррозии в балластных танках танкеров и балкеров.

Данные измерений остаточных толщин использовались для построения ФПВ Вейбулла статистическими методами для различных моментов времени жизненного цикла судна, при этом параметры формы и масштаба моделировались как функции времени методом аппроксимации кривых. D. K. Kim и соавторы [18] разработали нелинейную зависящую от времени модель для анализа данных измерений остаточных толщин балластных танков танкеров и балкеров с применением современных методов обработки данных.

Вероятностные методы, включая статистический анализ, использовались для выбора оптимальной ФПВ. Параметры выбранного распределения выражались как временные функции *методом аппроксимации кривых*. С использованием девятишагового алгоритма успешно получено эмпирическое уравнение для прогноза глубины коррозии в балластных танках. Обе модели [17, 18] улучшили учет неопределенностей и сложностей коррозионных процессов. Однако в использованных данных отсутствовала информация о состоянии защитных покрытий, а защитное действие покрытий предполагалось несущественным.

Коррозия морских судов носит стохастический характер. Представленные ранее модели коррозии определены посредством анализа обширных наборов данных, собранных с различных судов в ходе периодических освидетельствований, что позволяет прогнозировать общие тенденции возникновения и развития коррозии. Однако прямое применение этих моделей ограничено, поскольку коррозия конкретного судна может отличаться от общей тенденции из-за специфики эксплуатационных условий и режимов. Следовательно, для точного прогнозирования коррозионного состояния конкретных судов требуется калибровка этих моделей.

C. Guedes Soares и соавторы [19–21] предложили метод калибровки с учетом корректирующих коэффициентов условий эксплуатации путем мониторинга параметров среды на судне. Однако коррозия судовых конструкций обусловлена комплексом сложных факторов окружающей среды: ледовые условия, соленость морской воды, уровень pH, температура воды и воздуха, концентрация растворенного кислорода, биологическое обрастание, степень загрязненности воды, скорость течения, влажность и концентрация кислорода в атмосфере [22]. Поэтому более практичным является метод калибровки моделей на основе данных измерений остаточных толщин, полученных при периодических освидетельствованиях, так как эти данные непосредственно отражают реальный коррозионный процесс.

В данном исследовании представлен метод калибровки модели, ранее предложенной J. K. Paik и соавторами [14, 15], основанный на байесовском выводе (англ. *Bayesian Inference*) и алгоритме выборки по методу Монте-Карло с марковскими цепями (англ. *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC)). После калибровки модели глубина коррозии для компонентов конкретного судна в различные моменты времени в течение срока эксплуатации прогнозируется с помощью моделирования Монте-Карло (англ. *Monte Carlo Simulation*).

Цель данного исследования заключается в создании надежной модели, учитывающей погрешности измерений, пробелы (пропуски) в данных и факторы неопределенности, что повышает точность и достоверность прогнозирования глубины коррозии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эмпирическая модель коррозии. Модель коррозии, предложенная J. K. Paik и соавторами [14, 15] для прогнозирования глубины коррозии продольных силовых элементов балкеров, а также однокорпусных и двухкорпусных танкеров, принята в данном исследовании в качестве базовой. Процесс коррозии подразделяется на три последовательные стадии: 1) стадию срока службы (долговечности) защитного покрытия; 2) переходную стадию от стадии долговечности покрытия до возникновения коррозии; 3) стадию развития коррозии (рис. 1).

Долговечность защитного покрытия обычно зависит от типа системы покрытий, деталей его нанесения (например, подготовка поверхности, количество слоев, толщина пленки, контроль влажности и солёности при нанесении и т. д.), а также обслуживания и других факторов. Срок службы покрытия, обозначаемый как T_c , измеряемый в годах, считается случайной величиной, подчиняющейся логнормальному распределению.

Переходное время является периодом между потерей эффективности защитного покрытия и началом коррозии на достаточно большой и измеримой площади. Переходное время, обозначаемое как T_i , измеряемое в годах, считается случайной величиной и подчиняется экспоненциальному распределению. На стадии развития коррозии ее глубина описывается степенной функцией времени T , отсчитываемого с момента возникновения коррозии:

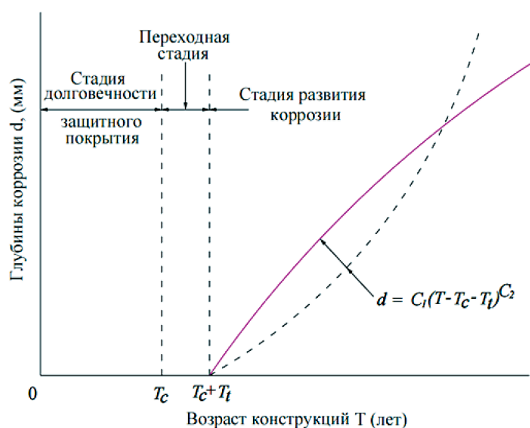


Рис. 1. Схема процесса коррозии морских конструкций
Fig. 1. Corrosion process diagram of marine structures

$$d(T) = C_1(T - T_c - T_i)^{C_2}, \quad (1)$$

где $d(T)$ — глубина коррозии, измеряемая в мм; T — возраст судна, измеряемый в годах; C_2 — коэффициент модели.

Байесовский вывод. Частотный подход является статистическим методом оценивания, основанным на частоте событий. Иными словами, частотный подход определяет вероятность как долгосрочную частоту возникновения события. Этот метод требует достаточно большого объема выборки и многократных испытаний для получения достоверных статистических оценок. Однако для крупногабаритных инженерных конструкций, таких как морские суда, сбор обширных данных измерений остаточных толщин требует значительных усилий и времени, причем каждый день простоя судна сопряжен с экономическими убытками. В отличие от частотного подхода байесовский вывод позволяет получать оценки даже при ограниченном объеме выборки за счет использования априорных знаний (например, из обобщенных моделей или экспертных оценок) и итеративно обновлять оценки по мере поступления новых данных.

Рассмотрим прогностическую модель M , параметры которой трактуются как случайные величины, отражающие ее неопределенность и образующие вектор θ . Теорема Байеса (англ. *Bayes' theorem*), являющаяся основой байесовского вывода, позволяет преобразовать априорную плотность $f(\theta)$ в апостериорную плотность $f(\theta|D)$ с учетом данных D , что выражается уравнением

$$f(\theta|D) = \frac{f(D|\theta)f(\theta)}{f(D)}, \quad (2)$$

где $f(D|\theta)$ — функция правдоподобия $\Lambda(\theta|D)$; $f(D)$ — маргинальное правдоподобие, выполняющее роль нормирующей константы, обеспечивающей $\int f(\theta|D)d\theta = 1$, что выражено уравнением

$$f(D) = \int_{\theta} f(D|\theta)f(\theta)d\theta. \quad (3)$$

Непосредственное вычисление интеграла в уравнении (3) часто оказывается невыполнимым в общем случае, что стимулировало развитие различных методов выборки для байесовского вывода. В данном исследовании используется усовершенствованный алгоритм выборки по методу МСМС — Гамильтоновский метод Монте-Карло (НМС), который ускоряет сэмплирование в многомерных пространствах и эффективно находит области высокой вероятности в целевом распределении.

Метод НМС. Приведем общее описание шагов МС для сэмплирования параметров θ с целевым распределением $f(\theta|D)$, определяемым уравнением (2) [23]:

Шаг 1 — *инициализация*. Выбирается начальное значение параметра $\theta^{(0)}$. Импульс p генерируется независимо от θ из многомерного нормального распределения: $p \sim N(0, M)$, где M — матрица массы, обычно выбираемая как единичная матрица I .

Шаг 2 — *моделирование гамильтоновой динамики*. Совместная плотность распределения $f(\rho, \theta)$ определяется гамильтонианом:

$$H(\theta | \rho) = -\log f(\rho, \theta) = K(\rho) + U(\theta), \quad (4)$$

где $U(\theta) = -\log f(\theta | D)$ — потенциальная энергия; $K(\rho) = \frac{1}{2} \rho^T M^{-1} \rho$ — кинетическая энергия.

Параметры θ и импульс ρ эволюционируют согласно уравнениям Гамильтона:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\partial H(\theta, \rho)}{\partial \theta} = -\frac{\partial U(\theta)}{\partial \theta} = \nabla_{\theta} \log f(\theta | D); \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial H(\theta, \rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial K(\rho)}{\partial \rho} = M^{-1} \rho. \quad (6)$$

где $\nabla_{\theta} \log f(\theta | D)$ — градиент логарифма апостериорной плотности $\log f(\theta | D)$.

Уравнения Гамильтона аппроксимируются с помощью метода «прыжок лягушки» (*англ. Leapfrog method*), который генерирует физически корректные состояния (θ, ρ) для гамильтоновой цепи. Алгоритм «прыжок лягушки» использует дискретный шаг интегрирования $\int$, применяемый поочередно для импульса ρ и параметров θ , при этом полный шаг обновления выполняется между двумя полушагами обновления ρ :

$$\rho(t + \int/2) = \rho(t) + (\int/2) \nabla_{\theta} \log f(\theta | D)|_{\theta=\theta(t)}; \quad (7)$$

$$\theta(t + \int) = \theta(t) + \int M^{-1} \rho(t + \int/2); \quad (8)$$

$$\rho(t + \int) = \rho(t + \int/2) + (\int/2) \nabla_{\theta} \log f(\theta | D)|_{\theta=\theta(t+\int)}. \quad (9)$$

После выполнения L шагов, моделирующих динамику в течение времени $\int L$, конечное состояние системы обозначается как (θ^*, ρ^*) .

Шаг 3 — *критерий Метрополиса*. Если бы интегратор «прыжок лягушки» работал идеально, не потребовалось бы дополнительных случайных шагов, кроме генерации начального импульса ρ . Однако на практике для коррекции ошибок численного интегрирования добавляется шаг Метрополиса, гарантирующий соответствие предложенного состояния гамильтониану $H(\theta, \rho)$.

Вероятность принятия α нового состояния (θ^*, ρ^*) , полученного преобразованием из (θ, ρ) , определяется выражением

$$\alpha = \min\{1, \exp[H(\theta, \rho) - H(\theta^*, \rho^*)]\}. \quad (10)$$

Если $\alpha \geq 1$, то новое состояние (θ^*, ρ^*) принимается безусловно. Если $\alpha < 1$, то новое состояние принимается с вероятностью α , а с оставшейся вероятностью $1 - \alpha$ отклоняется, сохраняя текущее состояние (θ, ρ) .

Шаг 4 — *итерация*. Процесс повторяется многократно до сходимости выборки.

Для диагностики сходимости цепей Маркова используется ряд методов, включая подходы, разработанные J. Geweke¹, Gelman и Rubin [24, 25], а также Raftery и Lewis [26]. Среди них диагностика Gelman-Rubin (G-R), являющаяся одним из наиболее распространенных инструментов оценки сходимости в методах МСМС.

Приведем общее описание диагностики G-R. Рассмотрим N параллельных цепей Маркова с разными начальными скалярными значениями $\theta^{(0)}$. Для каждой цепи n сохраняются выборки $\theta_n^{(1)}, \dots, \theta_n^{(K)}$. Межцепная B и внутрицепная дисперсии W вычисляются по формулам:

$$B = \frac{K}{N-1} \sum_{n=1}^N (\bar{\theta}_n - \bar{\theta}_*)^2; \quad (11)$$

¹ Geweke J. Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments / J. Geweke // Staff Report 148, Federal Reserve Bank of Minneapolis. — 1991. — Pp. 169–188.

$$W = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \left(\theta_n^{(k)} - \bar{\theta}_n \right)^2 \right], \quad (12)$$

где $\bar{\theta}_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \theta_n^{(k)}$ — среднее цепи n ; $\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\theta}_n$ — общее среднее всех цепей.

Оценка маргинальной апостериорной дисперсии $\hat{V}$ вычисляется по формуле

$$\hat{V} = \frac{K-1}{K} W + \frac{N+1}{KN} B. \quad (13)$$

Статистика G-R $\hat{R}$ контролирует сходимость через отношение

$$\hat{R} = \sqrt{\frac{\hat{V}}{W}}. \quad (14)$$

При $\hat{R} \cong 1$ диагностика G-R делает вывод о сходимости выборки.

Байесовское обновление модели коррозии. Байесовский вывод применяется для обновления параметров модели на основе данных замеров остаточных толщин, собранных в ходе периодических освидетельствований морских судов. Сначала необходимо сформулировать априорные представления, т. е. предположения о возможном статистическом распределении анализируемых параметров. Эти представления могут базироваться на граничных условиях или предшествующем аналитическом опыте. Затем с использованием байесовского вывода апостериорное распределение параметров обновляется по мере поступления новых данных, интегрируемых в модель.

Важным аспектом является возможность последовательных итераций: новое априорное распределение формируется из апостериорного, полученного на предыдущем шаге. Это позволяет уточнять распределение параметров даже при ограниченных данных, достигая более точного прогноза глубины коррозии на различных этапах эксплуатационного жизненного цикла судна.

Параметры модели коррозии представляют собой эпистемологические неопределенности, которые могут быть снижены путем сбора дополнительных данных и повышения их точности. Этапы обновления параметров на основе байесовского вывода с использованием НМС представлены на рис. 2.

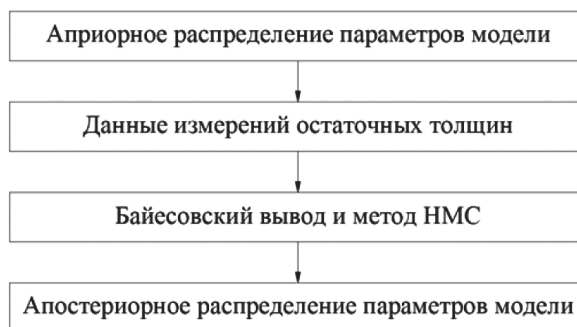


Рис. 2. Схема основных этапов обновления параметров модели коррозии
Fig. 2. Diagram of the main stages of updating corrosion model parameters

Применение предложенного метода для обновления параметров модели коррозии. В данном исследовании представлен иллюстративный пример обновления параметров модели коррозии, описываемой уравнением (1). Обновление выполнено на основе данных измерений остаточных толщин настила верхней палубы конкретного балкера, полученных в течение 15 лет эксплуатации. Предложенный метод одинаково применим ко всем остальным конструктивным элементам балкеров и танкеров.

Априорное распределение параметров. В данном исследовании априорное распределение параметров модели, выраженной уравнением (1), определено следующим образом:

1. Коэффициент C_1 считается случайной величиной, подчиняющейся распределению Вейбулла со средним значением $\mu_{C_1} = 0,1188$ и коэффициентом вариации $CV[C_1] = 0,9217$ на основе результатов исследования J. K. Paik и соавторов [14], ФПВ которого выражен уравнением

$$f(C_1; \lambda_{C_1}, k_{C_1}) = \frac{k_{C_1}}{\lambda_{C_1}} \left(\frac{C_1}{\lambda_{C_1}} \right)^{k_{C_1}-1} \exp \left[- \left(\frac{C_1}{\lambda_{C_1}} \right)^{k_{C_1}} \right], \quad (15)$$

где λ_{C_1} , k_{C_1} — параметры масштаба и формы распределения, определяемые на основе μ_{C_1} и $CV[C_1]$ путем решения системы уравнений:

$$\mu_{C_1} = \lambda_{C_1} \Gamma \left(1 + \frac{1}{k_{C_1}} \right); \quad (16)$$

$$CV[C_1] = \frac{\sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k_{C_1}} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k_{C_1}} \right) \right]^2}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k_{C_1}} \right)}. \quad (17)$$

В результате решения системы уравнений методом бисекции получены значения $k_{C_1} = 1,0860$ и $\lambda_{C_1} = 0,1226$.

2. Согласно результатам исследования J. K. Paik и соавторов [14], среднее значение срока службы покрытия составляет $\mu_{T_c} = 7,5$. В данном исследовании предполагается, что срок службы покрытия T_c является случайной величиной, подчиняющейся логнормальному распределению со средним значением $\mu_{T_c} = 7,5$ и коэффициентом вариации $CV[T_c] = 0,4$; ФПВ этого распределения выражен уравнением

$$f(T_c; \mu_{\ln T_c}, \sigma_{\ln T_c}) = \frac{1}{T_c \sigma_{\ln T_c} \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(\ln T_c - \mu_{\ln T_c})^2}{2\sigma_{\ln T_c}^2} \right], \quad (18)$$

где $\mu_{\ln T_c}$, $\sigma_{\ln T_c}$ — соответственно среднее значение и стандартное отклонение логарифма $\ln T_c$, связанные с известными значениями μ_{T_c} и $CV[T_c]$ соотношениями:

$$\mu_{\ln T_c} = \ln \frac{\mu_{T_c}}{\sqrt{CV[T_c]^2 + 1}}; \quad (19)$$

$$\sigma_{\ln T_c} = \sqrt{\ln(1 + CV[T_c]^2)}. \quad (20)$$

В результате решения системы уравнений получим следующие значения: $\mu_{\ln T_c} = 1,9407$; $\sigma_{\ln T_c} = 0,3853$.

3. Переходное время T_i принимается равным нулю, и процесс коррозии начинается сразу после потери эффективности защитного покрытия, как предложено J. K. Paik и соавторами [14].

4. Коэффициент C_2 принимается равным единице, что подразумевает постоянную годовую скорость коррозии независимо от времени, согласно предложению J. K. Paik и соавторов [14].

Модель коррозии выражается уравнением

$$d(T) = C_1 (T - T_c), \quad (21)$$

где $d(T)$ — глубина коррозии, измеряемая в мм; T — возраст судна, измеряемый в годах.

В табл. 1 представлены априорные параметры модели C_1 и T_c .

Таблица 1

Априорные параметры модели

Table 1

Prior parameters of the model

Параметры	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Априорное распределение
C_1	0,1188	0,1095	0,9217	Вейбулла ($\lambda_{C_1} = 0,1226, k_{C_1} = 1,0860$)
T_c	7,5	3,0	0,4	Логнормального ($\mu_{\ln T_c} = 1,9407, \sigma_{\ln T_c} = 0,3853$)

Все априорные параметры модели определены на основе обоснованных предположений и литературных данных [14]. Таким образом, коэффициент C_1 подчиняется распределению Вейбулла, а срок службы покрытия T_c — логнормальному распределению с заданными статистическими характеристиками (см. табл. 1). Предложенная вероятностная модель (21) и заданные априорные распределения являются основой для последующего обновления параметров с использованием байесовского вывода.

Данные измерений остаточных толщин и функция правдоподобия. Если прогнозируемая глубина коррозии $d^{(i)}$ определяется уравнением (21), а $D^{(i)}$ представляет собой глубину коррозии, измеренную ультразвуковым толщиномером, то всегда существует погрешность $\epsilon^{(i)}$ между прогнозируемым и измеренным значениями. Данная погрешность обусловлена ошибками измерений и моделирования и выражается уравнением

$$\epsilon^{(i)} = d^{(i)} - D^{(i)}. \quad (22)$$

Для n независимых измерений толщин в различных точках, выполненных во время периодического освидетельствования при возрасте судна T , погрешности $\epsilon^{(i)}$ предполагаются статистически независимыми и подчиняющимися нормальному распределению $N(0, \sigma^2)$. Функция правдоподобия $\Lambda(C_1, T_c | \{D^{(i)}\}_{i=1}^n)$, описывающая набор измеренных данных, задается уравнением

$$\Lambda(C_1, T_c | \{D^{(i)}\}_{i=1}^n) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(d^{(i)} - D^{(i)})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (23)$$

В данном исследовании, ввиду отсутствия данных измерений толщины настила верхней палубы, для имитации сильной степени коррозии используются прогнозные значения. Это допущение основано на режимах эксплуатации балкера в агрессивной морской среде, что обеспечивает обобщаемость и соответствие наихудшему сценарию. В частности, при периодическом освидетельствовании судна, возраст которого составляет 15 лет, выполнено n независимых измерений толщин в различных точках настила верхней палубы. После исключения измерений, превышающих значение исходной толщины, средняя глубина коррозии определяется в виде

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}. \quad (24)$$

Для представления состояния сильной коррозии настила верхней палубы средняя глубина коррозии D принимается равной 1,9 мм, что на 113,24 % превышает прогнозируемое значение средней глубины коррозии d , определяемое уравнением (21). Кроме того, стандартное отклонение σ принято равным 0,5. Тогда функция правдоподобия принимает следующий вид:

$$\Lambda(C_1, T_c | D) = \frac{1}{0,5\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(d-1,9)^2}{2 \cdot 0,5^2} \right] \quad (25)$$

где d — прогнозируемое значение средней глубины коррозии, определяемое уравнением (19), если возраст судна $T = 15$ лет.

Байесовский вывод и метод НМС. Процесс начинается с этапа инициализации алгоритма, на котором начальные значения C_1 и T_c выбираются из их априорных распределений (см. табл. 1). Затем на каждой итерации независимо от текущих значений параметров генерируется вспомогательный вектор импульсов ρ из многомерного нормального распределения $N(0, M)$, где матрица массы M обычно выбирается как единичная I .

Текущие значения параметров C_1 , T_c и вектора импульсов ρ совместно обновляются с использованием численного интегратора «прыжок лягушки» с дискретным шагом по времени Δ и числом шагов L в соответствии с гамильтоновой динамикой. Затем применяется критерий Метрополиса для решения о переходе в новое состояние (ρ^*, C_1^*, T_c^*) или сохранении текущего.

В результате генерируются цепь Маркова зависимых выборок значений C_1 и T_c , соответствующая апостериорной плотности. Процесс повторяется до достижения стационарности цепи Маркова и сходимости распределения выборок к апостериорному распределению. Для оценки сходимости используется статистика G-R $\hat{R}$.

Результаты и их обсуждение (Results and discussion)

Апостериорное распределение параметров модели. Для обеспечения достоверности результатов в данном исследовании было получено 20000 выборок после фазы адаптации в 10 000 шагов с целевой вероятностью принятия 0,9 для каждого параметра C_1 и T_c . Четыре параллельные цепи НМС иницировались из независимых начальных точек в пространстве параметров.

Для оценки сходимости были визуализированы апостериорные распределения с помощью графиков следов (рис. 3, а) и графиков плотности распределения (рис. 3, б), а также сводные апостериорные характеристики параметров, включая значения статистики G-R $\hat{R}$ сведены в табл. 2.

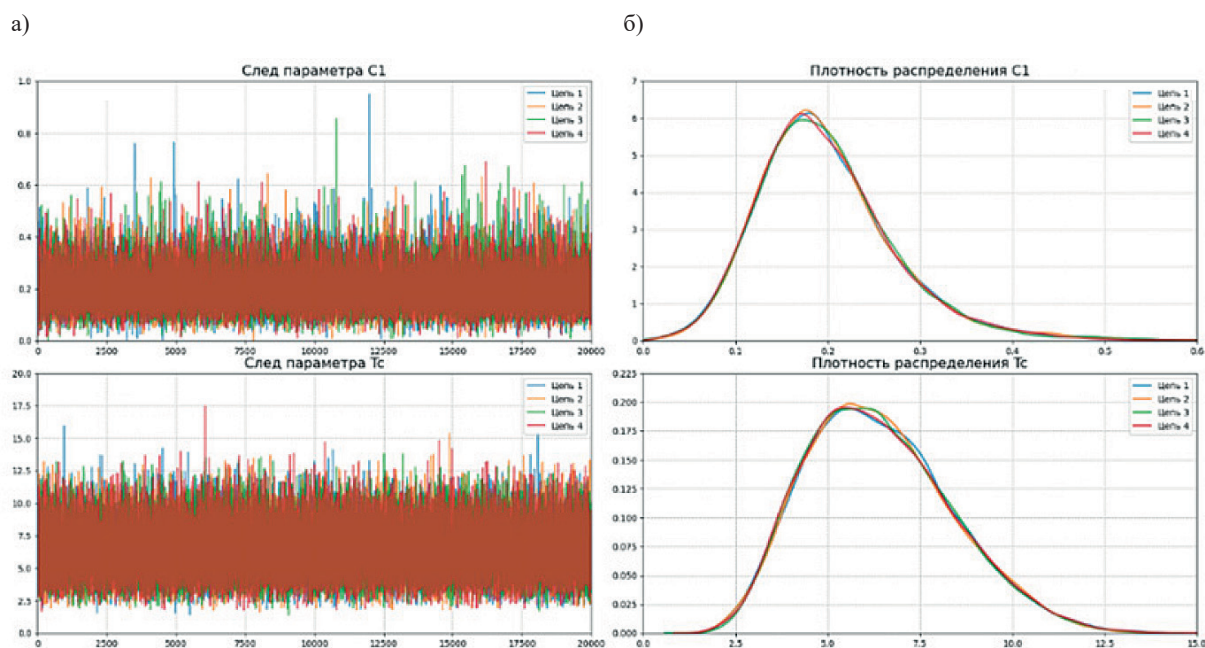


Рис. 3. Графики следов (а) и графики плотности распределения (б) для апостериорных распределений параметров C_1 и T_c
Fig. 3. Trace plots (a) and posterior density plots (b) for posterior distributions of parameters C_1 and T_c

Таблица 2

Апостериорные параметры модели

Table 2

Posterior model parameters

Параметры	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Апостериорное распределение	$\hat{R}$
C_1	0,1990	0,0770	0,3869	Гамма ($\alpha_{C_1} = 6,6533, \theta_{C_1} = 0,0299$)	1,0
T_c	6,3860	1,9720	0,3088	Гамма ($\alpha_{T_c} = 10,2704, \theta_{T_c} = 0,6218$)	1,0

Графики следов отображают значения параметров, полученные в ходе сэмплирования. Как показано на рис. 3, а, траектории цепей демонстрируют хорошее перемешивание, отсутствие выраженных трендов и эффективное исследование пространства параметров во всех четырех цепях для C_1 и T_c . Графики плотности вероятности сглажены с использованием метода ядерного оценивания плотности. На рис. 3, б кривые плотности для C_1 и T_c визуально неразличимы и не имеют видимого разделения между цепями, что указывает на сходимость цепей к единому апостериорному распределению несмотря на различные начальные точки. Кроме того, вычисленное значение статистики G-R $\hat{R}$ для C_1 и T_c равно единице (см. табл. 2), что подтверждает отличное перемешивание цепей и их сходимость к единому апостериорному распределению.

Всего для каждого параметра C_1 и T_c было получено по 80 000 выборок с четырех цепей, на основе которых построены гистограммы (рис. 4). Основной целью являлось сопоставление эмпирических распределений с известными теоретическими вероятностными распределениями с использованием критерия согласия Пирсона χ^2 (англ. *Chi — Squared Test*).

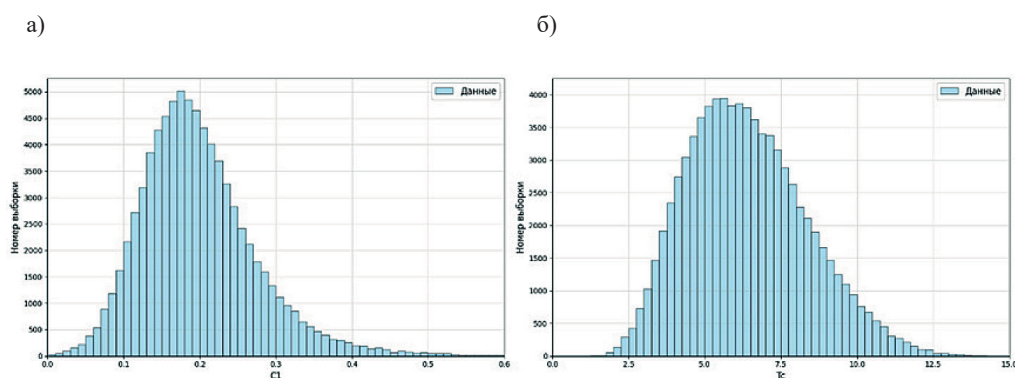


Рис. 4. Гистограммы апостериорных выборок параметров C_1 (а) и T_c (б)
Fig. 4. Histograms of posterior samples of parameters C_1 (a) and T_c (b)

Были оценены следующие распределения: нормальное, Вейбулла, логнормальное, логистическое, гамма и экспоненциальное. При этом наилучшее соответствие показало гамма-распределение.

Априорные и апостериорные распределения параметров C_1 и T_c представлены на рис. 5, откуда видно, что апостериорная плотность распределения смещается в область больших значений для параметра C_1 , соответствующего годовой скорости коррозии. Этот результат является ожидаемым, поскольку измеренная средняя глубина коррозии превысила значение, прогнозируемое исходной базовой моделью (см. уравнение (21)). В то же время модель демонстрирует низкую чув-

ствительность к параметру, поскольку форма его апостериорного распределения практически не изменилась. Согласно данным табл. 1 и 2, коэффициенты вариации для параметров C_1 и T_c уменьшились после обновления апостериорных распределений, что свидетельствует о снижении неопределенности оценок параметров.

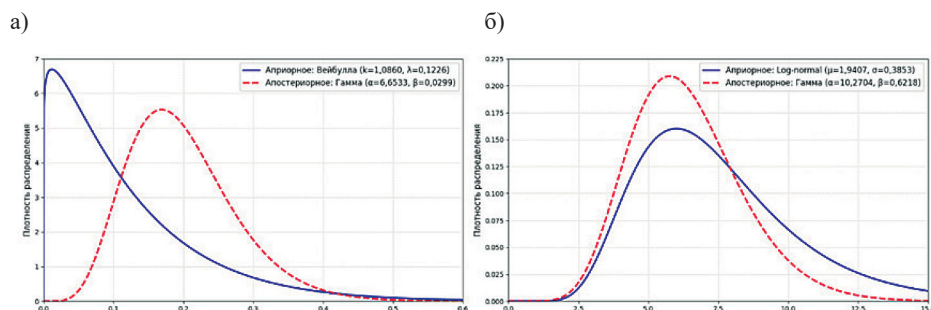


Рис. 5. Плотности априорных и апостериорных распределений параметров C_1 (а) и T_c (б)
Fig. 5. Densities of prior and posterior distributions of parameters C_1 (a) and T_c (б)

Прогнозирование глубины коррозии на основе апостериорных параметров модели. Для получения апостериорного распределения глубины коррозии на 15-летний срок эксплуатации и прогнозирования на периоды 20, 25 и 30 лет применяли метод апостериорного прогнозирования с использованием моделирования Монте-Карло. В рамках метода выполняли случайную выборку пар значений параметров C_1 и T_c из их апостериорных распределений для формирования набора $(C_1^{(i)}, T_c^{(i)})$. Далее для каждой отобранной пары параметров $(C_1^{(i)}, T_c^{(i)})$ вычисляли прогнозируемую глубину коррозии $d^{(i)}$ согласно модели (см. уравнение (21)).

Адекватность эмпирического распределения прогнозируемых значений $d^{(i)}$ оценивали посредством критерия согласия Пирсона χ^2 . Для достижения статистической значимости объем выборки составил 10^6 пар $(C_1^{(i)}, T_c^{(i)})$. Проверяли соответствие нескольких теоретических распределений: нормального, Вейбулла, логнормального, логистического, гамма и экспоненциального. Установлено, что во всех временных точках (15, 20, 25 и 30 лет) распределение глубины коррозии наилучшим образом описывается гамма-распределением. Визуализация результатов приведена на рис. 6.

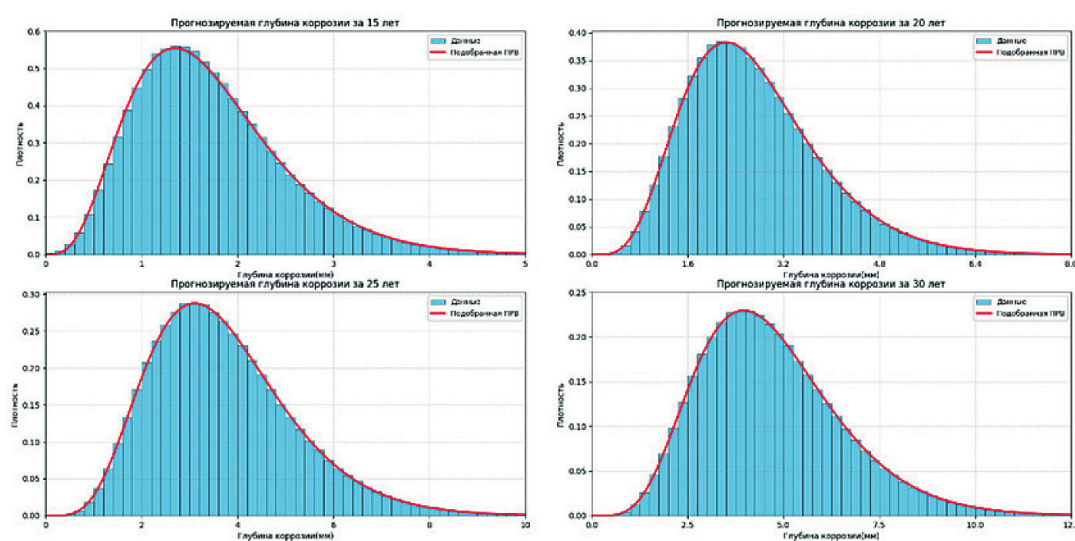


Рис. 6. Плотности апостериорных распределений глубины коррозии для сроков эксплуатации 15, 20, 25 и 30 лет, полученные с использованием апостериорных параметров модели

Fig. 6. Posterior density distributions of corrosion depth for service lives of 15, 20, 25, and 30 years obtained using posterior model parameters

В табл. 3 приведены параметры апостериорных распределений и прогнозируемые значения глубины коррозии для указанных сроков эксплуатации. Согласно данным табл. 3, прогнозируемое среднее значение глубины коррозии на 15-летний срок эксплуатации, рассчитанное по модели с апостериорными параметрами, составляет 1,7139 мм. Относительное отклонение от фактических данных (1,9 мм) составляет 10,87 %. Следует отметить, что с увеличением количества измерений обновленные прогнозные значения приближаются к фактическим данным.

Таблица 3

Параметры апостериорных распределений и точечные оценки глубины коррозии

Table 3

Parameters of posterior distributions and point estimates of corrosion depth

Возраст судна	15	20	25	30
50-й процентиль	1,5948	2,5472	3,4977	4,4492
50-й процентиль + + 2 стандартных отклонения	3,1722	4,8125	6,4960	8,1871
Среднее значение	1,7139	2,7093	3,7051	4,6986
Среднее значение + + 2 стандартных отклонения	3,2913	4,9746	6,7035	8,4365
90-й процентиль	2,7677	4,2205	5,7091	7,1917
95-й процентиль	3,1818	4,8074	6,4746	8,1453
97,5-й процентиль	3,5697	5,3592	7,1842	9,0236
Апостериорное распределение	Гамма $\left(\alpha_d = 4,6656; \right.$ $\left. \theta_d = 0,3673 \right)$	Гамма $\left(\alpha_d = 5,7873; \right.$ $\left. \theta_d = 0,4681 \right)$	Гамма $\left(\alpha_d = 6,1625; \right.$ $\left. \theta_d = 0,6012 \right)$	Гамма $\left(\alpha_d = 6,3608; \right.$ $\left. \theta_d = 0,7387 \right)$

В исследовании предполагается, что при наличии множества измерений они могут быть представлены единым усредненным измерением. В этом случае функция правдоподобия задается одномерным уравнением (25). Напротив, если каждое измерение требует отдельной функции правдоподобия, то для n измерений потребуется n вычислений функции правдоподобия, определяемых уравнением (23). Такой подход формирует более реалистичный сценарий, обеспечивая асимптотическое сближение прогнозируемых значений глубины коррозии обновленной модели с фактическими данными по мере увеличения объема измерений, что повышает достоверность модели.

В данном исследовании байесовский вывод и алгоритм выборки НМС реализованы на Python с использованием библиотеки PyMC [27]. Данный подход автоматизирует вычисление градиентов, оптимизацию размера шага $\int$ и числа шагов L , обеспечивая высокую вероятность принятия сэмплов. Для метода апостериорного прогнозирования с использованием моделирования Монте-Карло и верификации теоретических распределений по критерию Пирсона χ^2 применены библиотеки SciPy [28], что гарантирует статистическую достоверность результатов.

Заключение (Conclusion)

Прогностические модели коррозии обычно разрабатываются на основе данных, полученных с различных судов, поскольку процесс коррозии носит случайный характер. Несмотря на то, что обобщенные модели способны предсказывать общие тенденции возникновения и развития коррозии, их применимость к конкретному судну ограничена отклонением коррозионных условий от усредненных трендов, обусловленным спецификой эксплуатационной среды и режимов навигации. Данное исследование сфокусировано на прогнозировании глубины коррозии корпусных конструкций балкеров с использованием данных измерений остаточных толщин и обобщенной модели, предложенной J. K. Paik и соавторами.

Прогностическая модель позволяет учитывать погрешность измерений, пробелы в данных и другие факторы неопределенности. Прогнозируемое значение средней глубины коррозии в конкрет-

ный момент времени (15 лет) отклоняется от фактических данных примерно на 10,87 %. Ограничением работы является выполнение анализа на основе допущений о данных измерений остаточных толщин настила верхней палубы балкера в условиях эксплуатации высокоагрессивной морской среды.

Верификация результатов является критически важным этапом. Предлагается применять представленную методологию к реальным данным измерений остаточных толщин с последующим апостериорным обновлением параметров модели посредством байесовского вывода и НМС. На основе обновленных параметров прогнозирование глубины коррозии на различных этапах жизненного цикла судна осуществляется методом апостериорного прогнозирования с использованием сэмплирования Монте-Карло. Полученные прогнозы подлежат валидации путем сопоставления с результатами измерений толщин в ходе будущих периодических освидетельствований. Достоверность методологии подтверждается соответствием апостериорной коррозионной модели новым эмпирическим данным и ее превосходством в точности прогнозирования над базовой моделью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурнашева Н. В. Влияние коррозионного износа на прочность корпусных конструкций морских судов / Н. В. Бурнашева, М. А. Кудрин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 4(394). — С. 76–81. — EDN PKWRTN. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-76-81.
2. Southwell C. R. Estimating of service life of steel in seawater / C. R. Southwell, J. D. Bultman, J. C. Hummer. — New Jersey: Noyes Data Corporation, 1979. — Pp. 374–387.
3. Melchers R. E. Probabilistic modelling of immersion marine corrosion / R. E. Melchers // Structural Safety and Reliability. — 1998. — Vol. 3. — Pp. 1143–1149.
4. Guedes Soares C. Non-linear time dependent model of corrosion for the reliability assessment of maintained structural component / C. Guedes Soares, Y. Garbatov // Structural Safety and Reliability. — Vol. 2. — 1998. — Pp. 929–936.
5. Garbatov Y. Nonlinear Time Dependent Corrosion Wastage of Deck Plates of Ballast and Cargo Tanks of Tankers / Y. Garbatov, C. Guedes Soares, G. Wang // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2006. — Vol. 129. — Is. 1. — Pp. 48–55. DOI: 10.1115/1.2426987.
6. American Bureau of Shipping (ABS). ABS Database of Corrosion Wastage for Oil Tankers. — 2002. — ABS RD 2002–2007.
7. Qin S. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements / S. Qin, W. Cui // Marine Structures. — 2003. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 15–34. DOI: 10.1016/S0951-8339(02)00028-X.
8. Кутаев М. В. Прогнозирование технического состояния ледового пояса судов в эксплуатации / М. В. Кутаев, О. Э. Суров, В. А. Кулеш, И. А. Новосельцев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2025. — № 1(411). — С. 63–70. — EDN KDBOGK.
9. Кулеш В. А. Система DEFHULL — инновационная технология управления технической эксплуатацией флота / В. А. Кулеш, О. Э. Суров, А. В. Житников // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. — 2010. — № 3(5). — С. 23–34. — EDN OYJHMX.
10. Yamamoto N. A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach / N. Yamamoto, K. Ikegami // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 1998. — Vol. 120. — Is. 3. — Pp. 121–128. DOI: 10.1115/1.2829532.
11. Yamamoto N. A new model for predicting thickness loss due to both corrosion wear and mechanical wear / N. Yamamoto, A. Bollero, C. Won Son, H. Koyama, J. Choi, Y. Lv // Marine Structures. — 2024. — Vol. 97. — Pp. 103659. DOI: 10.1016/j.marstruc.2024.103659.
12. Kee Paik J. Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers / J. Kee Paik, S. Kyu Kim, S. Kon Lee // Ocean Engineering. — 1998. — Vol. 25. — Is. 10. — Pp. 837–860. DOI: 10.1016/S0029-8018(97)10009-9.
13. Paik J. K. A probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of tanker structures / J. K. Paik, Y. E. Park // Journal of the Society of Naval Architects of Korea. — 1998. — Vol. 35. — Is. 2. — Pp. 83–93.
14. Paik J. A Time-Dependent Corrosion Wastage Model for Bulk / J. Paik, A. Thayamballi, Y. I. Park, J. Hwang // International Journal of Maritime Engineering. — 2003. — Vol. 145(A2). — Is. 27. — Pp. 61–87. DOI: 10.3940/RINA.IJME.2003.A2.18031.

15. Paik J. K. A Time-Dependent Corrosion Wastage Model for the Structures of Single-and Double-Hull Tankers and FSOs and FPSOs / J. K. Paik, J. M. Lee, J. S. Hwang, Y. H. Park // *Marine Technology and SNAME News*. — 2003. — Vol. 40. — Is. 03. — Pp. 201–217. DOI: 10.5957/mtl.2003.40.3.201.
16. Guo J. Time-varying ultimate strength of aging tanker deck plate considering corrosion effect / J. Guo, G. Wang, L. Ivanov, A. N. Perakis // *Marine Structures*. — 2008. — Vol. 21. — Is. 4. — Pp. 402–419. DOI: 10.1016/j.marstruc.2008.03.002.
17. Paik J. K. Advanced method for the development of an empirical model to predict time-dependent corrosion wastage / J. K. Paik, D. K. Kim // *Corrosion Science*. — 2012. — Vol. 63. — Pp. 51–58. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.05.015.
18. Kim D. K. An advanced technique to predict time-dependent corrosion damage of onshore, offshore, nearshore and ship structures: Part II = Application to the ship's ballast tank / D. K. Kim, H. L. Lim, N-K. Cho // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 12. — Pp. 645–656. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.07.002.
19. Guedes Soares C. Corrosion wastage model for ship crude oil tanks / C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang // *Corrosion Science*. — 2008. — Vol. 50. — Is. 11. — Pp. 3095–3106. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.08.035.
20. Guedes Soares C. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere / C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang // *Corrosion Science*. — 2009. — Vol. 51. — Is. 9. — Pp. 2014–2026. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.05.028.
21. Guedes Soares C. Effect of environmental factors on steel plate corrosion under marine immersion conditions / C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. — 2011. — Vol. 46. — Is. 4. — Pp. 524–541. DOI: 10.1179/147842209X12559428167841.
22. Богород И. Я. Коррозия и защита морских судов / И. Я. Богород, Е. В. Искра, В. А. Климов, Ю. Л. Кузьмин. — Л.: Судостроение, 1973. — 392 с.
23. Neal R. M. MCMC using Hamiltonian dynamics / R. M. Neal // *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. — New York: Chapman and Hall/CRC, 2011. — Pp. 113–162. DOI: 10.1201/b10905.
24. Brooks S. P. General methods for monitoring convergence of iterative simulations / S. P. Brooks, A. Gelman // *Journal of Computational and Graphical Statistics*. — 1998. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 434–455.
25. Gelman A. Inference from iterative simulation using multiple sequences / A. Gelman, D. B. Rubin // *Statistical Science*. — 1992. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 457–472. DOI: 10.1214/ss/1177011136.
26. Raftery A. E. How many iterations in the Gibbs sampler? / A. E. Raftery, S. M. Lewis // *Bayesian Statistics 4 Handbook*. — Oxford: Oxford University Press, 1992. — Pp. 763–773.
27. Abril-Pla O. PyMC: a modern, and comprehensive probabilistic programming framework in Python / O. Abril-Pla, V. Andreani, C. Carroll, L. Dong, C. J. Fonnesbeck, M. Kochurov, R. Kumar, J. Lao, C. C. Luhmann, O. A. Martin, M. Osthege, R. Vieira, T. Wiecki, R. Zinkov // *PeerJ Computer Science*. — 2023. — Vol. 9. — Is. e1516. — Pp. 1–35. DOI: 10.7717/peerj-cs.1516.
28. Virtanen P. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python / P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, et al // *Nature methods*. — 2020. — Vol. 17. — Is. 3. — Pp. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

REFERENCES

1. Burnasheva, N. V. and M. A. Kudrin. “Influence of corrosive wear on hull strength of sea-going ships.” *Transactions of The Krylov State Research Centre* 4(394) (2020): 76–81. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-76-81.
2. Southwell, C. R., J. D. Bultman and J. C. Hummer. *Estimating of service life of steel in seawater*. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1979: 374–387.
3. Melchers, R. E. “Probabilistic modelling of immersion marine corrosion.” *Structural Safety and Reliability* 3 (1998): 1143–1149.
4. Guedes Soares, C. and Y. Garbatov. “Non-linear time dependent model of corrosion for the reliability assessment of maintained structural component.” *Structural Safety and Reliability* 2 (1998): 929–936.
5. Garbatov, Y., C. Guedes Soares and G. Wang. “Nonlinear Time Dependent Corrosion Wastage of Deck Plates of Ballast and Cargo Tanks of Tankers.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 129.1 (2006): 48–55. DOI: 10.1115/1.2426987.

6. American Bureau of Shipping (ABS). *ABS Database of Corrosion Wastage for Oil Tankers*. 2002. ABS RD 2002–2007.
7. Qin, S. and W. Cui. “Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements.” *Marine Structures* 16.1 (2003): 15–34. DOI: 10.1016/S0951–8339(02)00028-X.
8. Kitaev, M. V., O. E. Surov, V. A. Kulesh and I. A. Novosel'tsev. “Forecasting the technical condition of ice belt of ships in service.” *Transactions of The Krylov State Research Centre* 1(411) (2025): 63–70.
9. Kulesh, V. A., O. E. Surov and A. V. Zhitnikov. “System DEFHULL, innovative management technology of fleet technical operation.” *Fefu: School of Engineering Bulletin* 3(5) (2010): 23–34.
10. Yamamoto, N. and K. Ikegami. “A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 120.3 (1998): 121–128. DOI: 10.1115/1.2829532.
11. Yamamoto, N., Y. Lv et al. “A new model for predicting thickness loss due to both corrosion wear and mechanical wear.” *Marine Structures* 97 (2024): 103659. DOI: 10.1016/j.marstruc.2024.103659.
12. Kee Paik, J., S. Kyu Kim and S. Kon Lee. “Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers.” *Ocean Engineering* 25.10 (1998): 837–860. DOI: 10.1016/S0029-8018(97)10009-9.
13. Paik, J. K., Y. E. Park. “A probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of tanker structures.” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 35.2 (1998): 83–93.
14. Paik, J., A. Thayamballi, Y. I. Park and J. Hwang. “A time-dependent corrosion wastage model for bulk carrier structures.” *International Journal of Maritime Engineering* 145(A2).27 (2003): 61–87. DOI: 10.3940/RINA. IJME. 2003.A2.18031.
15. Paik, J. K., J. M. Lee, J. S. Hwang and Y. II. Park. “A Time-Dependent Corrosion Wastage Model for the Structures of Single-and Double-Hull Tankers and FSOs and FPSOs.” *Marine Technology and SNAME News* 40.03 (2003): 201–217. DOI: 10.5957/mtl.2003.40.3.201.
16. Guo, J., G. Wang, L. Ivanov and A. N. Perakis. “Time-varying ultimate strength of aging tanker deck plate considering corrosion effect.” *Marine Structures* 21.4 (2008): 402–419. DOI: 10.1016/j.marstruc.2008.03.002.
17. Paik, J. K. and D. K. Kim. “Advanced method for the development of an empirical model to predict time-dependent corrosion wastage.” *Corrosion Science* 63 (2012): 51–58. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.05.015.
18. Kim, D. K., H. L. Lim and N-K. Cho. “An advanced technique to predict time-dependent corrosion damage of onshore, offshore, nearshore and ship structures: Part II = Application to the ship's ballast tank.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 12 (2020): 645–656. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.07.002.
19. Guedes Soares, C., Y. Garbatov, A. Zayed and G. Wang. “Corrosion wastage model for ship crude oil tanks.” *Corrosion Science* 50.11 (2008): 3095–3106. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.08.035.
20. Guedes Soares, C., Y. Garbatov, A. Zayed and G. Wang. “Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere.” *Corrosion Science* 51.9 (2009): 2014–2026. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.05.028.
21. Guedes Soares C., Y. Garbatov and A. Zayed. “Effect of environmental factors on steel plate corrosion under marine immersion conditions.” *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46.4 (2011): 524–541. DOI: 10.1179/147842209X12559428167841.
22. Bogorod I. Ya., E. V. Iskra, V. A. Klimov, Yu. L. Kuz'min. *Korroziya i zashchita morskikh sudov*. L.: Sudostroenie, 1973.
23. Neal, R. M. “MCMC using Hamiltonian dynamics.” *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2011: 113–162. DOI: 10.1201/b10905.
24. Brooks S. P., A. Gelman. “General methods for monitoring convergence of iterative simulations.” *Journal of Computational and Graphical Statistics* 7.4 (1998): 434–455.
25. Gelman A., D. B. Rubin. “Inference from iterative simulation using multiple sequences.” *Statistical Science* 7.4 (1992): 457–472. DOI: 10.1214/ss/1177011136.
26. Raftery A. E., S. M. Lewis. “How many iterations in the Gibbs sampler?” *Bayesian Statistics 4 Handbook*. Oxford: Oxford University Press, 1992: 763–773.
27. Abril-Pla O., V. Andreani, C. Carroll, L. Dong, C. J. Fonnesbeck, M. Kochurov, R. Kumar, J. Lao, C. C. Luhmann, O. A. Martin, M. Osthege, R. Vieira, T. Wiecki, R. Zinkov. “PyMC: a modern, and comprehensive probabilistic programming framework in Python.” *PeerJ Computer Science* 9.e1516 (2023): 1–35. DOI: 10.7717/peerj-cs.1516.
28. Virtanen P., R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, et al. “SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python.” *Nature methods* 17.3 (2020): 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Огай Сергей Алексеевич —

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теории и устройства судна
Морской государственной университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а,
e-mail: *Ogay@msun.ru*.

Ле Чонг Тхинь —

аспирант кафедры теории и устройства судна
Морской государственной университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а,
e-mail: *letrongthinhdvtta@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ogay, Sergei A. —

Grand PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department
of Ship Theory and Design
Admiral G. I. Nevelskoy Maritime State University
50a, Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: *Ogay@msun.ru*

Le Trong Thinh —

Postgraduate Student of the Department of Ship
Theory and Design
Admiral G. I. Nevelskoy Maritime State University
50a, Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: *letrongthinhdvtta@gmail.com*

Статья поступила в редакцию: 09 февраля 2026 г.

Received: Feb. 9, 2026.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-335-345

EDN RWIEQA

УДК 656.61

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ УЯЗВИМОСТЯМИ В МОРСКИХ ПОРТАХ

О. С. Лаута¹, А. С. Куракин², Н. Н. Крамской²

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Общество с ограниченной ответственностью «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена разработке подхода по управлению уязвимостями в морских портах как критически важной части транспортной системы, подверженной киберугрозам. Научная задача заключается в снижении совокупного киберриска при ограниченных ресурсах служб информационной безопасности с учетом специфики объектов инфраструктуры морских портов и феномена несанкционированных информационных решений сотрудников. Темой исследования являются объекты инфраструктуры морского порта как совокупность физических элементов и связанных с ними информационных и операционных систем, предметом — процессы выявления, приоритизации и нейтрализации уязвимостей этих систем. Целью исследования является разработка формализованного подхода к управлению уязвимостями, интегрирующего динамическую инвентаризацию активов, многокритериальную оценку риска и оптимизацию распределения ресурсов между подразделениями, отвечающими за инфраструктуру и безопасность. Методологическую основу составляют математическое моделирование, в том числе логистическая функция для описания вероятности эксплуатации уязвимостей во времени, задача оптимизации с ограничениями и жадный алгоритм выбора последовательности исправлений, а также динамическая модель в виде системы дифференциальных уравнений. Предложена интегральная функция риска для пары «актив — уязвимость», учитывающая ценность и критичность актива, уровень его открытости, базовую опасность уязвимости, вероятность ее эксплуатации и наличие рабочих средств атаки. Разработана многоэтапная процедура приоритизации уязвимостей и распределения трудозатрат между техническими специалистами и специалистами по безопасности. Эффективность подхода продемонстрирована на примере резонансных уязвимостей 2024 года и типовой конфигурации объектов инфраструктуры морского порта. Получены количественные показатели результативности: сокращение среднего времени устранения уязвимостей, расширение охвата активов, снижение индекса остаточного риска и числа критических инцидентов при одновременном росте эффективности использования ресурсов. Сформулированные выводы подтверждают целесообразность перехода от статической оценки уязвимостей к динамическому риск-ориентированному подходу в управлении уязвимостями в морских портах.

Ключевые слова: информационная безопасность, объекты инфраструктуры морского порта, киберугроза, управление уязвимостями, математическая модель риска, динамическая оценка уязвимостей, приоритизация уязвимостей, инвентаризация активов, оптимизация распределения ресурсов, несанкционированные информационные решения.

Для цитирования:

Лаута О. С. Подход к управлению уязвимостями в морских портах / О. С. Лаута, А. С. Куракин, Н. Н. Крамской // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 335–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-335-345. — EDN RWIEQA.

APPROACH TO VULNERABILITY MANAGEMENT IN SEAPORTS

O. S. Laut¹, A. S. Kurakin², N. N. Kramskoy²

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

² Special Technological Center LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

The paper is devoted to the development of an approach to vulnerability management in seaports as a critical part of the transport system exposed to cyber threats. The research objective is to reduce overall cyber risk under limited information security resources, taking into account the specifics of seaport infrastructure facilities and the phenomenon of unauthorized decisions by personnel. The object of the study is seaport infrastructure facilities as a set of physical elements and associated information and operational systems, while the subject is the processes of identifying, prioritizing, and mitigating vulnerabilities of these systems. The goal of the study is to develop a formalized approach to vulnerability management integrating dynamic asset inventory, multi-criteria risk assessment, and optimization of resource allocation between units responsible for infrastructure and security. The methodological basis includes mathematical modeling, in particular a logistic function for describing the probability of vulnerability exploitation over time, a constrained optimization problem, a greedy algorithm for selecting remediation sequences, and a dynamic model in the form of a system of differential equations. An integrated risk function for the “asset–vulnerability” pair is proposed, taking into account asset value and criticality, its exposure level, baseline vulnerability severity, probability of exploitation, and the availability of exploitation tools. A multi-stage procedure for vulnerability prioritization and allocation of efforts between technical and security specialists is developed. The effectiveness of the approach is demonstrated using high-profile vulnerabilities of 2024 and a typical configuration of seaport infrastructure facilities. Quantitative performance indicators are obtained, including reduction in the average remediation time, increased asset coverage, reduction of residual risk index and number of critical incidents, along with improved resource utilization efficiency. The results confirm the feasibility of transitioning from static vulnerability assessment to a dynamic risk-based approach to vulnerability management in seaports.

Keywords: information security, seaport infrastructure facilities, cyber threats, vulnerability management, risk model, dynamic vulnerability assessment, vulnerability prioritization, asset inventory, resource allocation optimization, unauthorized decisions.

For citation:

Lauta, Oleg S., A. S. Kurakin and N. N. Kramskoy. “Approach to vulnerability management in seaports.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 335–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-335-345.

Введение (Introduction)

Морские порты представляют собой критически важные узлы глобальной логистической системы, обеспечивающие перевалку более 80 % мирового товарооборота. Ускоренная цифровизация портовых операций, внедрение автоматизированных систем управления контейнерными терминалами, интеграция операционных технологий (ОТ) с корпоративными информационными системами и массовое использование *IoT*-устройств существенно повысили эффективность портовой деятельности, создав при этом беспрецедентные киберриски. Анализ киберинцидентов 2023–2024 гг. демонстрирует критическое возрастание угроз для объектов инфраструктуры морских портов: количество кибератак на морские порты с 2017 г. растет трехзначными темпами [1, 2].

Специфика объектов инфраструктуры морского порта формирует уникальный профиль киберугроз, отличающийся от корпоративных информационных систем. В соответствии с Федеральным законом от 08.11.2007 № 261-ФЗ (ред. от 23.05.2025) «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» объектами инфраструктуры морского порта являются здания, сооружения, суда, устройства и оборудование, расположенные на территории морского порта и используемые для осуществления деятельности в целях торгового мореплавания, в том числе для оказания услуг.

Портовые операторы эксплуатируют гетерогенную среду, включающую перечисленные физические объекты инфраструктуры в совокупности с управляющими ими информационными и операционными технологиями — устаревшими ОТ-системами, не предназначенными для подключения к интернету, но интегрированными с современными информационно-телекоммуникационными сетями; автоматизированными перегрузочными кранами с удаленным доступом; системами контроля доступа; тысячами *IoT*-устройств с заводскими паролями и необновляемой прошивкой, каждое из которых может служить точкой входа для атакующих [3, 4].

Последствия успешных кибератак на объекты инфраструктуры морского порта превосходят по масштабу типичные корпоративные инциденты. Атака вредоносного программного обеспечения (ПО) *NotPetya* в 2017 г. нанесла компании *Maersk* ущерб в 300 млн долл. и парализовала операции ключевых мировых портов. *Ransomware*-атаки на порты Бельгии и Германии в 2023–2024 гг. продемонстрировали, что шифрование программного обеспечения, управляющего кранами, шлюзами и насосами, полностью останавливает физические операции. Таким образом, кибератака на информационную систему порта непосредственно влечет за собой остановку физической инфраструктуры.

Научная проблема состоит в том, что значительная часть успешных атак реализуется через уязвимости, для которых средства устранения уже доступны, однако компании не успевают их своевременно нейтрализовать. Первопричиной является неполнота инвентаризации активов и отсутствие структурированного механизма приоритизации. Ежедневно в международной базе общеизвестных уязвимостей информационной безопасности (*Common Vulnerabilities and Exposures (CVE)*) регистрируются десятки новых уязвимостей; параллельно функционирует Банк данных угроз безопасности информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (БДУ ФСТЭК), ориентированная на отечественные продукты. Из тысяч уязвимостей, зарегистрированных в 2024 г., лишь 74 получили статус «трендовых», т. е. тех, которые злоумышленники уже используют или могут эксплуатировать в ближайшем будущем. Следовательно, необходим механизм фильтрации и приоритизации, способный выделить критически важные угрозы из информационного шума [5].

Существующие открытые стандарты к управлению уязвимостями, основанные на статической оценке (*Common Vulnerability Scoring System (CVSS)*), оказываются неадекватными для портовой среды по трем причинам. Во-первых, они не учитывают критическую временную динамику: для критических уязвимостей ОТ-систем портов среднее время появления рабочих программ, направленных на эксплуатацию ошибок или слабых мест в компьютерных системах, программах или электронных устройствах (эксплойтов), сократилось до 2–3 суток. Во-вторых, традиционные методы не отражают специфику портовых активов с различными уровнями критичности для непрерывности цепи поставок. В-третьих, отсутствует интегрированный механизм приоритизации уязвимостей в условиях ограниченных ресурсов служб информационной безопасности [6, 7].

Целью настоящего исследования является разработка формализованного подхода к управлению уязвимостями объектов инфраструктуры морских портов, обеспечивающего минимизацию совокупного киберриска за счет интеграции динамической инвентаризации активов, многокритериальной приоритизации уязвимостей и оптимизации распределения ресурсов между подразделениями информационных технологий (ИТ) и информационной безопасности (ИБ).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Традиционные методы базируются на статической оценке по системе *CVSS*, присваивающей уязвимости числовой балл от 0 до 10 на основе базовых показателей: вектора атаки, сложности эксплуатации, необходимых привилегий и воздействия на конфиденциальность, целостность и доступность данных.

Формула расчета базового балла *CVSS* 3.0:

$$\text{BaseScore} = \text{roundTo1Decimal}((0,6 \cdot \text{Impact}) + (0,4 \cdot \text{Exploitability}) - 1,5) \cdot f(\text{Impact}).$$

Данный подход имеет существенный недостаток: он не учитывает временную динамику угроз. Уязвимость с баллом 7 представляет принципиально иной уровень риска по сравнению с аналогичной уязвимостью, для которой в течение двух дней появился работающий эксплойт, активно применяемый в атаках.

Исследователями были предприняты попытки усовершенствования *CVSS* путем введения временных и контекстных показателей. Байесовские сети позволяют учитывать доступность эксплойтов и предпринимать усилия по исправлению. Методы машинного обучения (МО) предсказывают

вероятность эксплуатации на основе анализа текстовых описаний. Графовые методы моделируют пути атак и каскадные эффекты. Многокритериальная оптимизация балансирует конкурирующие факторы: воздействие, эксплуатабельность, критичность и ресурсные ограничения. Однако ни один из существующих подходов не интегрирует одновременно три критически важных компонента: динамическую модель инвентаризации активов с учетом использования сотрудниками информационных технологий, цифровых устройств, программного обеспечения и интернет услуг без одобрения со стороны специалистов по ИБ (феномен *Shadow IT*), многофазную модель приоритизации уязвимостей с использованием логистической функции и оптимизационный алгоритм распределения ресурсов между подразделениями ИТ и ИБ.

Рассмотрев конкретные примеры резонансных уязвимостей 2024 г., можно убедиться в многообразии векторов атак:

CVE-2024-47177 в подсистеме *CUPS filters* позволяла запустить вредоносный код через конфигурацию принтера в системах *Linux*, *macOS* и *iOS*;

CVE-2024-38112 эксплуатировала устаревший компонент *Internet Explorer* в *Windows* для выполнения произвольного кода;

CVE-2024-6387 (regreSSHion) позволяла атаковать систему на этапе аутентификации *SSH* с выполнением кода от имени суперпользователя *root*;

CVE-2024-49112 (LDAP Nightmare) вызывала циклическую перезагрузку серверов *Windows*;

CVE-2024-21378 предоставляла удаленный доступ к серверам *Exchange*.

Анализируя эти примеры, можно сделать вывод о том, что современные злоумышленники успешно используют принтеры, браузеры, сетевой протокол прикладного уровня (*Secure Shell (SSH)*), протокол прикладного уровня для доступа к службе каталогов (*Lightweight Directory Access Protocol (LDAP)*), почтовые серверы для удаленного выполнения кода, обхода средств защиты и захвата инфраструктуры [5, 7].

Еще один практический вызов кроется в необходимости синхронизации деятельности подразделений ИТ и ИБ. Недостаточно назвать идентификатор *CVE* — необходимо четко указать *IP*-адреса или полное имя домена (*Fully Qualified Domain Name, FQDN*) пораженных систем и определить шаги по нейтрализации: обновить ПО, наложить патч безопасности или применить компенсирующие меры. Отсутствие структурированного процесса коммуникации приводит к задержкам в устранении уязвимостей и увеличивает временное окно для потенциальной атаки.

На основе выявленных противоречий формулируется следующая научная гипотеза: разработка подхода к управлению уязвимостями, интегрирующего многокритериальную оценку рисков активов с динамическим приоритизационным алгоритмом, позволит повысить эффективность нейтрализации уязвимостей на 30–45 % по сравнению с традиционными подходами, основанными исключительно на статической оценке *CVSS*.

Подход к управлению уязвимостями (*Vulnerability Management Approach*)

Формализация задачи. Пусть имеется множество активов инфраструктуры $A = \{a_1, a_2, a_n\}$, где каждый актив a_i характеризуется параметрами: v_i — ценность актива (определяется по уровню критичности (последствиям) при нарушении характеристик безопасности); c_i — критичность для деятельности; $e_j \in [0, 1]$ — уровень экспозиции (степень уязвимости системы к угрозам кибератак). Множество обнаруженных уязвимостей $V = \{v_1, v_2, v_m\}$, где для каждой уязвимости v_j определены: s_j — базовая оценка *CVSS*; $p_j(t)$ — вероятность эксплуатации в момент времени t ; d_j — временная задержка с момента обнаружения уязвимости до её публикации в базе *CVE* в днях; $w_j \in \{0, 1\}$ — бинарный индикатор наличия активного использования уязвимости злоумышленниками в системах и программах.

Ресурсные ограничения задаются параметрами: R_{IT} — доступные ресурсы ИТ-подразделения в чел.-ч; $R_{ИБ}$ — доступные ресурсы ИБ-подразделения; $T_{\max}$ — максимально допустимое время устранения критических уязвимостей. Матрица инцидентности $M_{n \times m}$ определяет связь между активами и уязвимостями $m_{ij} = 1$, если актив a_i подвержен уязвимости v_j , в противном случае $m_{ij} = 0$.

Подход к управлению уязвимостями в морских портах включает четыре этапа.

Первый этап — расчет динамического риска для каждой пары «актив–уязвимость». Интегральная функция риска для актива a_i с уязвимостью v_j имеет вид:

$$R_{ij}(t) = v_i \cdot c_i \cdot e_i \cdot \left[\alpha \cdot s_j + \beta \cdot p_j(t) + \gamma \cdot w_j \cdot e^{-\lambda d_j} \right], \quad (1)$$

где α, β, γ — весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию $\alpha + \beta + \gamma = 1$; λ — коэффициент временной деградации риска; первый множитель $v_i \times c_i \times e_i$ характеризует собственные свойства актива: чем выше его ценность, критичность и уровень экспозиции, тем больший ущерб влечет его компрометация; второй множитель в квадратных скобках интегрирует три компоненты риска уязвимости: компонента $\alpha \times s_j$ отражает базовую опасность уязвимости согласно CVSS; компонента $\beta \times p_j(t)$ вносит временную динамику через вероятность эксплуатации; компонента $\gamma \times w_j \times e^{-\lambda d}$ учитывает наличие активного эксплойта с экспоненциальным убыванием значимости по мере увеличения времени с момента публикации.

Вероятность эксплуатации моделируется логистической функцией

$$p_j(t) = \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}}, \quad (2)$$

где L — максимальная вероятность эксплуатации; k — скорость роста угрозы; t_0 — точка перегиба.

Выбор логистической функции обусловлен эмпирическими наблюдениями за жизненным циклом уязвимостей: после публикации вероятность эксплуатации растет медленно (период исследования злоумышленниками), затем наступает фаза быстрого роста (появление работающих эксплойтов и автоматизированных инструментов), после чего рост замедляется, асимптотически приближаясь к максимуму (рис. 1).

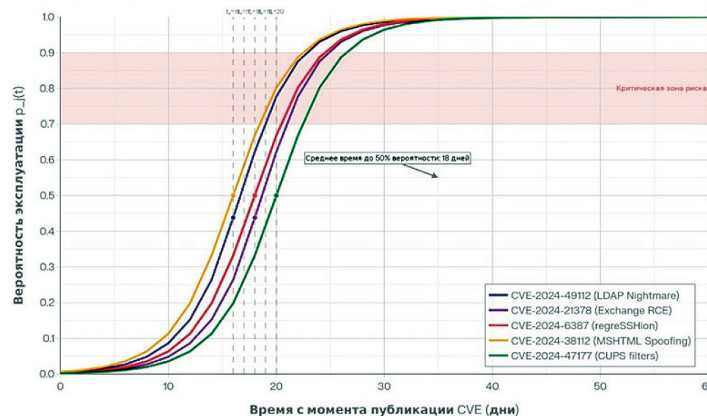


Рис. 1. Динамика вероятности эксплуатации уязвимостей во времени — логистическая модель

Fig. 1. Dynamics of the probability of vulnerability exploitation over time — logistic model

Второй этап — многокритериальная приоритизация [8, 9]. Совокупный риск инфраструктуры в момент t :

$$R_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij} \cdot R_{ij}(t). \quad (3)$$

Задача оптимизации формулируется как минимизация $R_{\text{total}(t)}$ при ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m r_j^{\text{IT}} \leq R_{\text{IT}}; \\ \sum_{j=1}^m r_j^{\text{IB}} \leq R_{\text{IB}}; \\ t_j^{\text{remediation}} \leq T_{\text{max}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $r_j^{\text{IT}}, r_j^{\text{IB}}$ — требуемые ресурсы для устранения уязвимости v_j .

Задача относится к классу задач оптимизации с ограничениями и решается методами динамического программирования или жадными алгоритмами.

Третий этап — оптимальное распределение ресурсов. Применяется метод жадного алгоритма с приоритетной очередью, где приоритет уязвимости v_j вычисляется как [10, 11]:

$$\text{Priority}(v_j) = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij} \cdot R_{ij}(t)}{r_j^{IT} + r_j^{IB}}. \quad (5)$$

Уязвимости ранжируются по убыванию приоритета, формируя оптимальную последовательность устранения. В числителе суммируется риск по всем активам, подверженным данной уязвимости; знаменатель учитывает необходимые ресурсы, тем самым предпочтение отдается уязвимостям с наибольшим соотношением «риск / стоимость устранения».

Четвертый этап применяется для сложных сценариев с взаимозависимыми уязвимостями. Используется система дифференциальных уравнений, решаемая методом Рунге – Кутты четвертого порядка [12]

$$\frac{dV(t)}{dt} = \alpha(t) - \beta(t) \cdot P(t) - \delta(t) \cdot V(t), \quad (6)$$

где $V(t)$ — количество активных уязвимостей в момент времени t ; $P(t)$ — количество установленных обновлений (патчей); $\alpha(t)$ — скорость обнаружения новых уязвимостей; $\beta(t)$ — эффективность влияния патчей для программ и операционных систем на достижение целей организации через обучение сотрудников; $\delta(t)$ — естественная деградация актуальности уязвимостей.

Уравнение (6) описывает динамическое равновесие между появлением новых уязвимостей, их устранением и потерей актуальности со временем.

Результаты (Results)

Проиллюстрируем применение разработанного подхода с использованием данных резонансных уязвимостей 2024 г. Рассмотрим инфраструктуру с пятью критическими активами: сервер баз данных ($v_1 = 0,95$), web-сервер ($v_2 = 0,8$), рабочие станции *Shadow IT* ($v_3 = 0,4$), сетевое оборудование ($v_4 = 0,85$), почтовый сервер ($v_5 = 0,9$) [13].

На этих активах обнаружены уязвимости: *CVE-2024-6387 (regreSSHion, $s_1 = 8,1$; $d_1 = 3$; $w_1 = 1$)*, *CVE-2024-38112 ($s_2 = 7,5$; $d_2 = 2$; $w_2 = 1$)*, *CVE-2024-47177 ($s_3 = 7,0$; $d_3 = 5$; $w_3 = 1$)*, *CVE-2024-49112 (LDAP Nightmare, $s_4 = 9,8$; $d_4 = 1$; $w_4 = 1$)*, *CVE-2024-21378 (Exchange RCE, $s_5 = 9,8$; $d_5 = 4$; $w_5 = 1$)*.

Выполним расчет интегральной функции риска для момента времени $t = 10$ дней с параметрами $\alpha = 0,4$.

Для первого актива (сервер баз данных) вычислим вероятность эксплуатации:

$$p_1(10) = \frac{0,9}{1 + e^{-0,5(10-18)}} = 0,0162,$$

где $t_0 = d_1 + 15 = 18$ дней — точка перегиба.

Базовая оценка нормализуется: $s'_1 = 8,1/10 = 0,81$.

Интегральный риск

$$R_{11}(10) = 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,6 \cdot [0,4 \cdot 0,81 + 0,35 \cdot 0,0162 + 0,25 \cdot 1 \cdot e^{-0,15 \cdot 3}] = 0,2732.$$

Аналогичные вычисления для остальных активов дают: $R_{22}(10) = 0,2522$, $R_{33}(10) = 0,0456$, $R_{44}(10) = 0,3257$, $R_{55}(10) = 0,3528$.

Принципиально важный результат: рабочая станция *Shadow IT* с уязвимостью *CVE-2024-47177* имеет наименьший риск $R_{33}(10) = 0,0456$ несмотря на максимальный уровень экспозиции $e_3 = 0,95$. Это объясняется низкими значениями ценности и критичности данного актива, что логично соответствует практике: *Shadow IT*-устройства менее критичны для инфраструкту-

ры, но именно высокая экспозиция делает их предпочтительной точкой входа для атакующих. Наибольший риск представляет почтовый сервер с уязвимостью *Exchange RCE* ($R_{55}(10) = 0,3528$), что обусловлено критической важностью актива и максимальным баллом *CVSS*.

Сравним разработанный подход к управлению уязвимостями с существующими по ключевым показателям эффективности, используя статический метод *CVSS* и традиционное управление уязвимостями (*Vulnerability Management (VM)*). Данные приведены в таблице.

Сравнительная характеристика методологий

Comparative analysis of methodologies

Показатель эффективности	Статический <i>CVSS</i>	Традиционный <i>VM</i>	Предлагаемая методология
Среднее время, необходимое для устранения сбоя и полного восстановления работы системы (<i>Mean Time to Repair (MTTR)</i>), дни	45	32	18
Покрытие активов, %	65	78	95
Индекс остаточного риска	0,72	0,58	0,32
Количество критических инцидентов в год	28	18	7
Эффективность использования ресурсов, %	58	71	92
Точность приоритизации, %	62	74	89

Статический метод *CVSS* представлен как упрощенный метод расчета риска, традиционный *VM* — как сложившаяся практика (совокупность методов), предлагаемый подход — как разрабатываемая система принципов, отличающаяся от первых двух подходов комплексностью и динамическим характером оценки риска. На рис. 2 показана динамика снижения совокупного риска во времени для различных подходов, демонстрирующая существенное преимущество предлагаемого подхода.

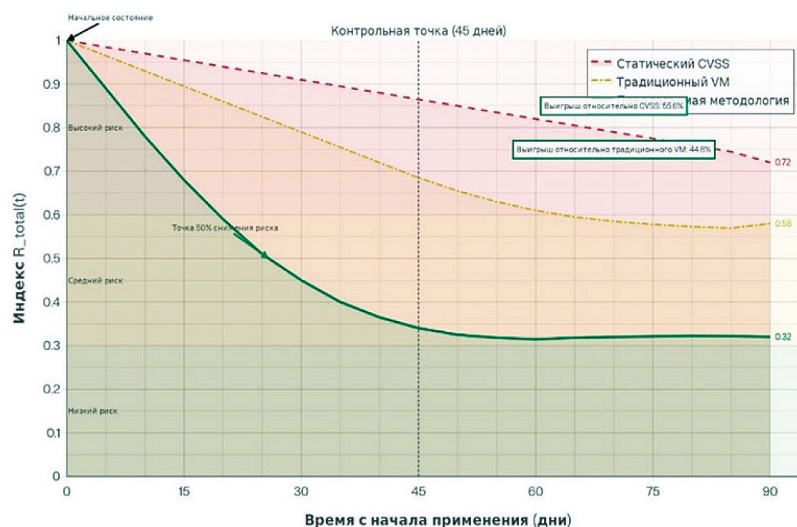


Рис. 2. Сравнительная динамика снижения совокупного риска инфраструктуры

при применении различных подходов к управлению уязвимостями

Fig. 2. Comparative dynamics of reduction of overall infrastructure risk under different vulnerability management approaches

Количественные показатели результативности подхода: сокращение *MTTR* составляет 60 % относительно статического подхода *CVSS* (с 45 до 18 дней); увеличение покрытия активов на 46,2 % (с 65 % до 95 %) критически важно в контексте феномена *Shadow IT*; снижение индекса остаточного риска на 55,6 % (с 0,72 до 0,32) означает, что после применения предложенного подхода остаточный риск инфраструктуры составляет менее 1/3 от исходного уровня; сокращение количества критических инцидентов на 75 % (с 28 до семи в год) представляет прямой экономический эффект: каждый предот-

вращенный инцидент экономит сотни тысяч или миллионы долларов на ликвидацию последствий, восстановление репутации, а также штрафы регуляторов. Интегральное повышение эффективности составляет 63,5 %, что существенно превышает изначально предполагаемый диапазон 30–45 %.

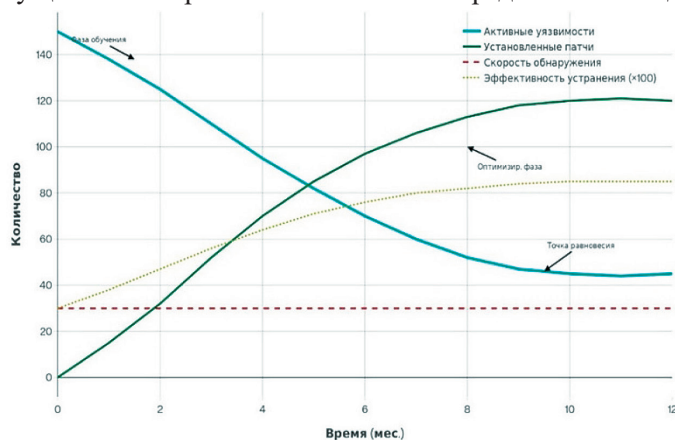


Рис. 3. Решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты 4-го порядка: динамика активных уязвимостей, установленных патчей и эффективности процесса

Fig. 3. Solution of a system of differential equations using the fourth-order Runge – Kutta method: dynamics of active vulnerabilities, applied patches, and process efficiency

Решение уравнения $dV(t)/dt = \alpha(t) - \beta(t) \cdot P(t) - \delta(t) \cdot V(t)$ методом Рунге – Кутты позволяет прогнозировать динамику количества активных уязвимостей и планировать ресурсы на перспективу (рис. 3). При постоянной скорости обнаружения новых уязвимостей $\alpha(t) = 30$ в месяц и растущей эффективности процесса патчей $\beta(t)$ система достигает динамического равновесия на уровне 45 активных уязвимостей к девятому-десятому месяцу.

Обсуждение (Discussion)

Таким образом, внедрение разработанного подхода предполагает восемь последовательных шагов организации процесса управления уязвимостями:

1. Определение критически опасных инцидентов: взлом инфраструктуры, кража данных, утечка конфиденциальных сведений. Без четкой формулировки событий, которые не должны произойти, любые процессы в ИБ становятся мероприятиями без практического результата.

2. Назначение ролей и зон ответственности: кто сканирует активы, кто проводит инвентаризацию, кто устраняет уязвимости, кто контролирует исправления. Разделение функций необходимо даже в небольшой команде.

3. Оценка реальных ресурсов команды: количество выявляемых уязвимостей и пропускная способность одного сотрудника определяют адекватные ожидания к срокам.

4. Подготовка технической базы: выделенные учетные записи для специалистов ИБ, привилегированные доступы для администраторов, профили сканирования под различные операционные системы.

5. Выстраивание процесса выявления и устранения уязвимостей: инвентаризация активов, поиск уязвимостей по базам CVE и БДУ ФСТЭК, формирование рекомендаций для ИТ с конкретными инструкциями, передача задач, контроль выполнения и повторная проверка.

6. Обеспечение понятной коммуникации между ИТ и ИБ: специалист по ИБ обязан объяснить, зачем устранять конкретную уязвимость, и что именно требуется от администратора — обновить, отключить или удалить компонент.

7. Автоматизация контроля устранения: передача списков уязвимостей в виде таблиц Excel гарантированно замедляет процесс. Выполнение задач должно фиксироваться и проверяться автоматически, иначе уязвимости будут закрываться только формально.

8. Мониторинг актуальности процессов: выстроенный однажды процесс требует регулярного обновления с учетом новых уязвимостей, версий ПО и изменений в команде. Управление уязвимостями представляет собой непрерывную деятельность.

Критически важным аспектом разработанного подхода является учет феномена *Shadow IT* через параметр экспозиции e_i . В подходе учтена процедура автоматического обнаружения: анализ сетевого трафика на предмет неизвестных устройств, мониторинг *VPN*-подключений от нестандартных хостов, аудит облачных сервисов (*Cloud Access Security Broker*). Обнаруженные *Shadow IT* получают высокое значение экспозиции e_i , близкое к единице.

Выводы (Summary)

Результаты проведенного исследования:

1. Установлено, что объекты инфраструктуры морского порта формируют уникальный и расширенный профиль киберугроз по сравнению с типичными корпоративными системами.

2. Выявлены три ключевых ограничения статической оценки *CVSS* применительно к морским портам: игнорирование временной динамики угроз, неучет специфики критичности портовых активов и отсутствие интегрированного механизма приоритизации при ограниченных ресурсах.

3. Разработан подход управления уязвимостями: система принципов (динамическая инвентаризация, динамическая приоритизация, ресурсная оптимизация) и четыре последовательных этапа: расчет динамического риска → многокритериальная приоритизация → оптимальное распределение ресурсов → динамическое моделирование.

4. Верификация на основе данных резонансных уязвимостей 2024 г. подтвердила существенное превосходство разработанного подхода: сокращение *MTTR* на 60 %, рост покрытия активов на 46,2 %, снижение остаточного риска на 55,6 %, сокращение критических инцидентов на 75 %, интегральный прирост эффективности на 63,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катаев С. А. Анализ актуального состояния и тенденций киберпреступности в России / С. А. Катаев // Молодой ученый. — 2025. — № 4(555). — С. 400–402. — EDN WMUPUR.
2. Стародубцев Ю. И. Техносферная война как основной способ разрешения конфликтов в условиях глобализации / Ю. И. Стародубцев, П. В. Закалкин, С. А. Иванов // Военная мысль. — 2020. — № 10. — С. 16–21. — EDN NKВМОУ.
3. Иванов Ю. С. Анализ устойчивости предиктивных моделей к состязательным атакам в робототехнических комплексах / Ю. С. Иванов, М. А. Горькавый, Д. М. Грабарь // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — 2023. — № 1(65). — С. 109–115. — EDN ZEEYLW. DOI: 10.17084/20764359–2023–65–109.
4. Котенко И. В. Методика обнаружения аномалий и кибератак на основе интеграции методов фрактального анализа и машинного обучения / И. В. Котенко, И. Б. Саенко, О. С. Лаута, А. М. Крибель // Информатика и автоматизация. — 2022. — Т. 21. — № 6. — С. 1328–1358. — EDN IWILXQ. DOI: 10.15622/ia.21.6.9.
5. Полещук Е. М. Анализ уязвимостей и угроз информационной безопасности морских портов / Е. М. Полещук, С. Е. Путилова, И. А. Щербинина // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. — 2021. — № 1–2. — С. 149–151. — EDN CLFUVUO.
6. Давлатов Ш. Р. Анализ защищенности веб-ресурсов на основе метрики *CVSS* / Ш. Р. Давлатов, П. В. Кучинский // Информатика. — 2020. — Т. 17. — № 3. — С. 72–77. — EDN GFQCXR. DOI: 10.37661/1816-0301-2020-17-3-72-77.
7. Пахомова А. С. Оценка применимости методики *CVSS* для риск-анализа защищаемых систем / А. С. Пахомова, Д. Н. Рахманин, Л. В. Парина, Ю. К. Язов // Информация и безопасность. — 2017. — Т. 20. — № 1. — С. 129–132. — EDN YRNMOT.
8. Гарина С. В. Оптимизация многокритериальных решений / С. В. Гарина, Б. М. Люпаев, М. Б. Нишкин // Вестник Мордовского университета. — 2015. — Т. 25. — № 4. — С. 12–17. — EDN VKAAUX. DOI: 10.15507/0236–2910.025.201504.012.

9. Кармоков М. М. Оптимальное распределение ресурсов / М. М. Кармоков, М. А. Кереев, З. О. Бесланеев // Экологические системы и приборы. — 2015. — № 11. — С. 44–48. — EDN UYFTLP.
10. Лившиц Е. Д. Реализуемость жадных алгоритмов / Е. Д. Лившиц // Труды института математики и механики УрО РАН. — 2010. — Т. 16. — № 4. — С. 228–236. — EDN MXFPBX.
11. Лившиц Е. Д. О нижних оценках скорости сходимости жадных алгоритмов / Е. Д. Лившиц // Известия Российской академии наук. Серия математическая. — 2009. — Т. 73. — № 6. — С. 125–144. — EDN RDNGGT. DOI: 10.4213/im2742.
12. Альмяшев И. Н. Альмяшев, И. Н. Методы Рунге – Кутта / И. Н. Альмяшев, А. А. Тарасов // Инновации. Наука. Образование. — 2021. — № 48. — С. 1201–1209. — EDN WCINIB.
13. Котенко И. В. Атаки и методы защиты в системах машинного обучения: анализ современных исследований / И. В. Котенко, И. Б. Саенко, О. С. Лаута [и др.] // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — № 1(59). — С. 24–37. — EDN IZQDLS. DOI: 10.21681/2311-2024-1-24-37.

REFERENCES

1. Kataev, S. A. “Analiz aktual’nogo sostoyaniya i tendentsiy kiberprestupnosti v Rossii.” *Molodoy uchenyy* 4(555) (2025): 400–402.
2. Starodubtsev, Yu. I., P. V. Zakalkin and S. A. Ivanov. “Technosphere warfare as the chief method of conflict settlement in conditions of globalization.” *Voennaya Mysl’* 10 (2020): 16–21.
3. Ivanov, Yu. S., M. A. Gor’kavyu and D. M. Grabar’. “Analysis of predictive models stability to adversarial attacks in robotics complexes.” *Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University* 1(65) (2023): 109–115. DOI: 10.17084/20764359–2023–65–109.
4. Kotenko, I. V., I. B. Saenko, O. S. Lauta and A. M. Kribel’. “Anomaly and cyber attack detection technique based on the integration of fractal analysis and machine learning methods.” *Informatics and Automation* 21.6 (2022): 1328–1358. DOI: 10.15622/ia.21.6.9.
5. Poleschuk, E. M., S. E. Putilova and I. A. Scherbinina. “Analiz uyazvimostey i ugroz informatsionnoy bezopasnosti morskikh portov.” *Electronic Devices and Control Systems: International Scientific-Practical Conference* 1–2 (2021): 149–151.
6. Davlatov, Sh. R. and P. V. Kuchinskiy. “Web resource security analysis based on cvss metrics.” *Informatics* 17.3 (2020): 72–77. DOI: 10.37661/1816-0301-2020-17-3-72-77.
7. Pakhomova, A. S., D. N. Rakhmanin, L. V. Parinova and Yu. K. Yazov. “Otsenka primenimosti metodiki CVSS dlya risk-analiza zaschischaemykh sistem.” *Informatsiya i bezopasnost’* 20.1 (2017): 129–132.
8. Garina, S. V., B. M. Lyupaev and M. B. Nikishin. “Optimization of multi-criteria decisions.” *Vestnik Mordovskogo universiteta* 25.4 (2015): 12–17. DOI: 10.15507/0236–2910.025.201504.012.
9. Karmokov, M. M., M. A. Kerreev and Z. O. Beslaneev. “Optimal resource allocation.” *Ekologicheskie sistemy i pribory* 11 (2015): 44–48.
10. Livshits, E. D. Feasibility of Greedy Algorithms // Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. — No. 4 (16). — Pp. 228–236.
11. Livshits, E. D. “Lower bounds for the rate of convergence of greedy algorithms.” *Izvestiya: Mathematics* 73.6 (2009): 1197–1215. DOI: 10.1070/IM2009v073n06ABEH002478.
12. Al’myashev, I. N. and A. A. Tarasov. “Al’myashev, I. N. metody Runge — Kutta.” *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* 48 (2021): 1201–1209.
13. Kotenko, I. V., I. B. Saenko, O. S. Lauta et al. “Attacks and defense methods in machine learning systems: analysis of modern research.” *Voprosy Kiberbezopasnosti* 1(59) (2024): 24–37. DOI: 10.21681/2311–2024–1–24–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаута Олег Сергеевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Двинская улица, д. 5/7
e-mail: laos-82@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lauta, Oleg S. —
Grand PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya street,
St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: laos-82@yandex.ru

Куракин Александр Сергеевич —

кандидат технических наук

ООО «Специальный технологический центр»

195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
проспект Непокорённых, д. 17\

e-mail: nirt@mail.ru

Крамской Николай Николаевич — соискатель

ученой степени кандидата технических наук

ООО «Специальный технологический центр»

195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
проспект Непокорённых, д. 17

e-mail: kram.com@mail.ru

Kurakin, Aleksandr S. —

PhD in Technical Sciences

Special Technological Center

17, Nepokorennnykh prospekt, St. Petersburg,
195220, Russian Federation

e-mail: nirt@mail.ru

Kramskoy, Nikolai N. — External PhD Researcher
in Technical Sciences

Special Technological Center

17, Nepokorennnykh prospekt, St. Petersburg,
195220, Russian Federation

e-mail: kram.com@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 03 февраля 2026 г.

Received: Feb. 3, 2026.

**РАЗРАБОТКА СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИХ АВТОНОМНЫХ НАДВОДНЫХ СУДОВ
С УЧЕТОМ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЙ****А. А. Буцанец¹, А. П. Беспалов¹, А. М. Жидкова²**¹ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация²ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является разработка состава компонентов и структуры системы автоматического управления морских автономных надводных судов с учетом внешних возмущений. Выполнен обзор актуальной научной литературы по системам управления автономными судами, включая отечественные и зарубежные исследования. Рассмотрены классические законы регулирования курса судна пропорциональным, пропорционально-дифференциальным и пропорционально-интегрально-дифференциальными методами с дополнениями, учитывающими внешние воздействия. Предложена модернизация трехуровневой иерархической структуры системы автоматического управления, состоящей из нижнего уровня первичной информации (датчики), среднего уровня обработки данных и верхнего уровня управления и контроля. Предложен принцип циклической оценки среднего значения внешнего возмущения и модифицированный пропорционально-дифференциальный закон управления рулевым приводом с дополнительной коррекцией по углам крена, дифферента и опережающей компенсацией внешних воздействий. Приведены обоснования того, что предлагаемые решения позволяют компенсировать влияние волнения, ветра и течений, повысить точность удержания заданного курса и надежность автоматического управления в сложных гидрометеорологических условиях. Отмечается, что предложенная структура обладает масштабируемостью, открытостью к модернизации и удобством интеграции с внешними системами: системой управления движением судов, автоматической системой управления движением судна и др. Дополнительный контроль параметров мореходности (периоды рыскания, бортовой и килевой качки) реализован без увеличения количества датчиков. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем автономного судовождения, а также способствуют повышению безопасности судоходства.

Ключевые слова: морские автономные суда, система автоматического управления, внешние возмущения, трехуровневая структура, пропорционально-дифференциальный закон, коррекция возмущения, стабилизация курса, навигационные датчики, рулевой привод, автономное судовождение, иерархическая архитектура, оценка внешних воздействий.

Для цитирования:

Буцанец А. А. Разработка состава компонентов системы автоматического управления морских автономных надводных судов с учетом внешнего воздействия / А. А. Буцанец, А. П. Беспалов, А. М. Жидкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 346–357. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-346-357. — EDN ZVFJHA.

**DEVELOPMENT OF THE COMPONENT COMPOSITION
OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR MARITIME AUTONOMOUS
SURFACE SHIPS UNDER EXTERNAL DISTURBANCES****A. A. Butsanets¹, A. P. Besspalov¹, A. M. Zhidkova²**¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint Petersburg, Russian Federation²Krylov State Research Center, Saint Petersburg, Russian Federation

The study focuses on the development of the component composition and structure of the automatic control system for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) under external disturbances. A review of relevant scientific

literature on autonomous ship control systems, including both Russian and international studies, was carried out. Classical ship heading control laws based on proportional, proportional-derivative, and proportional-integral-derivative methods were considered together with additional provisions accounting for external influences. A modernized three-level hierarchical structure of the automatic control system is proposed, comprising the lower level of primary information acquisition (sensors), the middle level of data processing, and the upper level of control and monitoring. A principle of cyclic estimation of the mean value of external disturbance and a modified proportional-derivative control law for the steering gear actuator with additional correction for roll and trim angles, as well as feedforward compensation of external influences, are proposed. It is substantiated that the proposed solutions make it possible to compensate for the effects of waves, wind, and currents, improve the accuracy of maintaining the preset course, and enhance the reliability of automatic control under adverse hydrometeorological conditions. The proposed structure is characterized by scalability, openness to further modernization, and convenient integration with external systems, including vessel traffic management systems, ship motion control systems, and related subsystems. Additional monitoring of seakeeping parameters, including yaw, roll, and pitch periods, is implemented without increasing the number of sensors. The results can be used in the design of autonomous navigation systems and contribute to improving navigation safety.

Keywords: Maritime Autonomous Surface Ships, automatic control system, external disturbances, three-level structure, proportional-derivative control law, disturbance correction, course stabilization; navigation sensors, steering gear actuator, autonomous navigation, hierarchical architecture, external disturbance estimation.

For citation:

Butsanets, Artem A., A. P. Bepalov and A. M. Zhidkova. "Development of the component composition of the automatic control system for maritime autonomous surface ships under external disturbances" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 346–357. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-346-357.

Введение (Introduction)

В условиях активного внедрения технологий автоматизации на морском транспорте приобретает высокую актуальность разработка состава компонентов системы автоматического управления морских автономных надводных судов (МАНС). Рост интереса к безэкипажным и дистанционно управляемым судам обусловлен необходимостью повышения эффективности грузоперевозок, снижения влияния человеческого фактора и обеспечения безопасности плавания в сложных гидрометеорологических условиях.

Внешние возмущения (волнение моря, ветер, течения, других объектов) усложняют задачу стабилизации судна на курсе и требуют адаптивных алгоритмов управления, выходящих за рамки классических ПД- и ПИД-законов. Современные модели и алгоритмы порой разрабатываются без учета этих факторов, что приводит к накоплению ошибок курса и снижению точности управления в реальной ситуации.

Анализ научных публикаций показывает, что проблемы создания систем управления МАНС активно исследуются как в России, так и за рубежом. Одними из сравнительно крупных отечественных научных работ, посвященных концептуальным аспектам построения систем дистанционного управления беспилотным техническим флотом, являются [1], а также работа, посвященная обеспечению интеллектуальных транспортных систем [2].

Проблемы создания МАНС на этапе технического задания и проектирования под надзором РС освещены в работе В. В. Устинова, в которой автор анализирует уровни автономности и конструктивные особенности судовых технических средств, обеспечивающих безопасное плавание, в том числе с использованием портовых буксиров [3]. Д. В. Литов и О. С. Хватов рассматривают этапы разработки структуры САУ морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна в соответствии с Положениями РС (ФАУ «Российский морской регистр судоходства»), формируют перечень источников информации для ситуационной осведомленности и определяют минимальные требования к подтверждению уровня безопасности, эквивалентного или превосходящего уровень безопасности обычных судов [4].

Важным направлением является разработка систем мониторинга и диагностики. Так, например, В. И. Степанова и С. В. Смоленцев предлагают концепцию единой системы мониторинга, диагностики и тестирования (ЕСМДиТ) оборудования МАНС, похожие подходы рассмотрены

в работе [5]. Авторы обосновывают преимущества иерархической распределенной архитектуры по сравнению с зарубежными аналогами (Kongsberg, Wärtsilä, ABB), отмечая ее вклад в повышение надежности и снижение эксплуатационных затрат [6].

Международный взгляд на вызовы представлен в обзорной статье [7]. Исследователи анализируют технологические, регуляторные, правовые и этические проблемы внедрения МАНС. Особое внимание уделяется необходимости целостных подходов к созданию нормативно-правовой базы и межотраслевому сотрудничеству для обеспечения безопасного и устойчивого развития автономного судоходства.

Особенности дистанционного управления в портовых водах с использованием конвенционных навигационных средств рассмотрены в работе [8]. Автор акцентирует внимание на развитии систем мониторинга в реальном времени, прогнозировании состояния судна и расчете точности решения навигационных задач без детализации конкретных моделей оборудования. Выявлены слабые места существующих технологий и даны рекомендации по их совершенствованию для безопасного расхождения судов.

Одно из особенно актуальных направлений, активно обсуждаемых в литературе, посвящено кибербезопасности. В работе [9] предложено пять независимых моделей внешних кибератак на сеть АИС (от единичной подделки сигнала до многоэтапных комбинированных атак) и проанализированы внутренние угрозы. Авторы рекомендуют сочетание программно-алгоритмических и аппаратно-архитектурных мер защиты, включая дополнительные системы мониторинга аномалий. В работах [10, 11], посвященных методам искусственного интеллекта в системах навигации, также затронуты вопросы выявления аномалий в данных АИС и необходимости создания дополнительных мониторинговых систем. Кроме непосредственной эксплуатации судов, актуальным является вопрос швартовки автономных судов. Например, в работе [12] сформулирован перечень необходимого оборудования и принципы автоматизированной швартовки.

Авторами работы [13] выполнен обзор базовых алгоритмов управления курсом и скоростью, сформулированы проблемы создания комплексной системы управления и определены направления дальнейших исследований. Важным является вопрос моделирования маневренных испытаний автономных судов на навигационном симуляторе. Работа [14] подтверждает возможность определения навигационно-маневренных характеристик в различных условиях для последующих натурных экспериментов. Авторами [15] разработан алгоритм обеспечения безопасности навигации на мелководье и в стесненных акваториях на основе аналитических моделей гидродинамических взаимодействий, а также предложены режимы «Мелководье» и «Канал» с визуализацией критических параметров. Вопросы доверия к системам автономного судоходства в контексте критической информационной инфраструктуры и импортозамещения исследованы в работе [16], где рассмотрен переход на отечественные аппаратно-программные платформы.

Выполненный обзор литературы не охватывает все аспекты развития систем управления автономными судами, но свидетельствует о многогранности выявленных научных задач: существует потребность как в концептуальном проектировании структуры САУ и нормативного регулирования, так и конкретных алгоритмов оценки внешних возмущений, киберзащиты и мониторинга. Таким образом, научная литература сводится к задаче построения безопасной системы автоматического управления морскими автономными надводными судами, функционирование которой должно повышать безопасность судоходства и снижать вероятность наступления аварийной ситуации. Многофакторность процесса управления объектами водного транспорта очевидна, как и невозможность его исчерпывающего описания, однако данная работа может стать очередным звеном автоматизации моделирования поведения и процесса управления.

Цель работы — определить состав компонентов, структуру и основной принцип функционирования системы автоматического управления морских автономных надводных судов (МАНС) с учетом внешних воздействий (волнение, ветер и др.).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- дополнить ранее предложенную трехуровневую иерархическую структуру системы автоматического управления МАНС (нижний — первичной информации, средний — обработки, верхний — управления и контроля);
- на основе дополненной структуры определить базовый состав датчиков нижнего уровня и функций уровня обработки и управления, а также математически описать принцип управления с коррекцией по оценке внешнего возмущения ($\varphi_{\text{корр. ср}}$), учитывающий компенсацию внешнего воздействия.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для построения САУ морских автономных надводных судов вначале следует рассмотреть упрощенное уравнение системы стабилизации судна на курсе. Для удобства рассмотрим силы, действующие на судно (рис. 1).

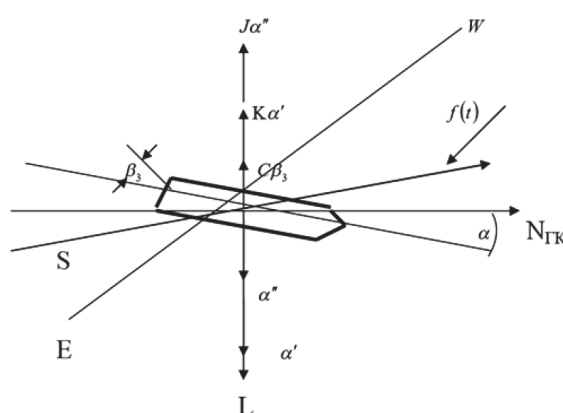


Рис. 1. Силы, действующие на судно
Fig. 1. Forces acting on the ship

Рассмотрим ситуацию, когда судно движется заданным гирокомпасным курсом (ГКК). В определенный момент времени t под воздействием внешних факторов $f(t)$ (волнение, ветер, реакция винта и т. д.) судно начинает уходить с курса. Угловое отклонение судна от линии курса обозначено на рис. 1 как угол α . Боковое смещение судна с линии в данном случае упускается. Отклонение судна с курса вызовет появление угловой скорости α' и углового ускорения α'' .

Относительно вертикальной оси судна, проходящей через его центр тяжести, будут действовать следующие моменты: $C\beta_3$ — момент, создаваемый пером руля; $K\alpha'$ — момент сопротивления вращению судна; $J\alpha''$ — инерционный момент. Приравняв сумму этих моментов к моменту, вызываемому внешними воздействиями L , получим следующее уравнение моментов:

$$J\alpha'' + K\alpha' + C\beta_3 = L,$$

где J — момент инерции судна; K — коэффициент пропорциональности.

Для автоматического управления рулевым приводом судна с целью удержания на заданном курсе могут использоваться три основных закона регулирования:

1. Пропорциональный (П):

$$\beta_3 = K_1\alpha,$$

где K_1 — коэффициент обратной связи по курсу.

2. Пропорционально-дифференциальный (ПД):

$$\beta_3 = K_1\alpha + K_2\alpha',$$

где K_2 — коэффициент обратной связи по угловой скорости поворота судна.

3. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД):

$$\beta_3 = K_1\alpha + K_2\alpha' + K_3\int\alpha dt.$$

Поскольку пропорциональный закон недостаточно эффективен, а ПИД дает лучший результат по сравнению с ПД только на установившихся режимах, в данной работе будет использован модифицированный принцип пропорционально-дифференциального закона регулирования.

В настоящее время многие модели САУ движением судна проектируются без учета волнения и ветра, при этом гарантируется движение по заданному маршруту. При волнении и с появлением внешних воздействий возникают более сложные условия эксплуатации при использовании известных законов управления движением судна.

Внешние воздействия на судно трудноизмеряемы и зависят от следующих переменных факторов: характеристики волнения и скорости ветра, характеристики судна, направления движения судна, скорость хода судна, остойчивость и др. Таким образом, использование пропорционально-дифференциального закона управления, оптимального только при отсутствии внешних воздействий, является недостаточным. Влияние внешнего воздействия приводит к появлению низкочастотных постоянных внешних сил, воздействующих на судно, что вызывает смещение направления движения судна относительно заданного маршрута, появление ошибки, и, соответственно, при управлении снижает качество и точность автоматического управления судном.

При разработке системы автоматического управления МАНС целесообразно использовать классический подход разбиения объекта исследования на части с сохранением унифицированных внешних и внутренних интерфейсов для информационных потоков. При этом рассматривается трехуровневая структура системы управления (рис. 2), синтезированная с традиционным системным анализом и работой [1], где вне границ функционирующей системы присутствует внешняя среда. Данный подход обеспечивает высокую надежность работы системы в целом, возможность модернизации его составных частей, открытость к интеграции с другими системами, масштабируемость и более продолжительный жизненный цикл.



Рис. 2. Трехуровневая организация системы автоматического управления МАНС с учетом внешнего воздействия
Fig. 2. Three-level organization of the automatic control system for MASS under external disturbances

Базовыми (исходными) элементами предлагаемой структуры САУ МАНС, определяющими ее функциональные свойства, выступают датчики, формирующие нижний уровень классической трехуровневой иерархической организации — *уровень первичной информации*.

Количество датчиков, их принцип действия и характер измеряемых параметров определяются общими потребностями системы, а также целесообразностью применения в конкретных условиях. При этом возможности уровня обработки первичной информации выступают в качестве естественного ограничивающего фактора. В качестве датчиков могут быть использованы: спутниковый компас, бесплатформенная инерциальная навигационная система, датчики оборотов винтов, датчик угла поворота винторулевой колонки, камеры наружного наблюдения, транспондер АИС, лидар и др.

Датчики, измерительные приборы и регистрирующая аппаратура являются автономными первичными источниками информации. При реализации обратной связи и построении активной системы управления на уровне первичной информации необходимо также выделить исполнительные механизмы. Управляющие сигналы для этих механизмов формируются на уровне обработки с помощью системы управления числом оборотов винтов и системы управления винторулевой колонкой. Данные сигналы вырабатываются на основании команд, поступающих с верхнего уровня от оператора, или анализируются в автоматическом режиме.

Функции взаимодействия с датчиками и первичной обработки поступающей информации возлагаются на средний уровень — *уровень обработки*. Его основная задача заключается в выполнении комплексного анализа данных, поступающих от датчиков, выработке агрегированного значения целевой функции, а также контроле достоверности информации. Кроме того, на среднем уровне осуществляется мониторинг технического состояния датчиков и обеспечивается маршрутизация (коммутация) информационных потоков в прямом и, при необходимости, в обратном направлении: между датчиками и исполнительными механизмами.

Верхний уровень — *уровень управления и сигнализации* — реализует три ключевые функции:

- обеспечивает информационное взаимодействие и обмен данными с внешними по отношению к системе автоматического управления МАНС системами (в частности, например, с СУДС/АСУ ДС и лоцманом);
- формирует результирующие сигналы в системе поддержки принятия решений по предупреждению развития аварийных ситуаций;
- вырабатывает управляющие сигналы в контурах обратной связи при функционировании активной системы управления.

Такая трехуровневая организация системы автоматического управления МАНС признана наиболее эффективной с точки зрения достижения поставленных целей, обеспечения надежности системы, ее интегрируемости с другими комплексами и дальнейшей масштабируемости. Под масштабируемостью в данном контексте понимается возможность расширения номенклатуры и количества датчиков при модернизации модели развития ситуации и усложнении задач управления.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Трехуровневая иерархическая организация САУ МАНС представлена на рис. 3. Рассмотренная трехуровневая организация данной системы принимается наиболее эффективной для обеспечения надежности системы, интегрируемости с другими системами и масштабируемости. Под масштабируемостью системы применительно к САУ МАНС подразумевается возможность расширения числа и типа датчиков, информация от которых будет необходима в случае модернизации модели развития ситуации и при решении задач управления.

Кроме навигационных параметров, значимыми при оценке управляемости судна являются: период рыскания, период бортовой качки и период килевой качки. Эти значения могут быть получены на втором уровне в устройстве обработки информации по измерениям, выполненным на первом уровне. Таким образом, дополнительный контроль мореходности судна не приводит к увеличению датчиков нижнего уровня первичной информации. Вычислительные мощности блоков анализатора и коммутатора на уровне обработки измерений определяются количеством используемых измерительных датчиков, частотой опроса, необходимой для решения задачи моделирования, и объемом измерительной информации.

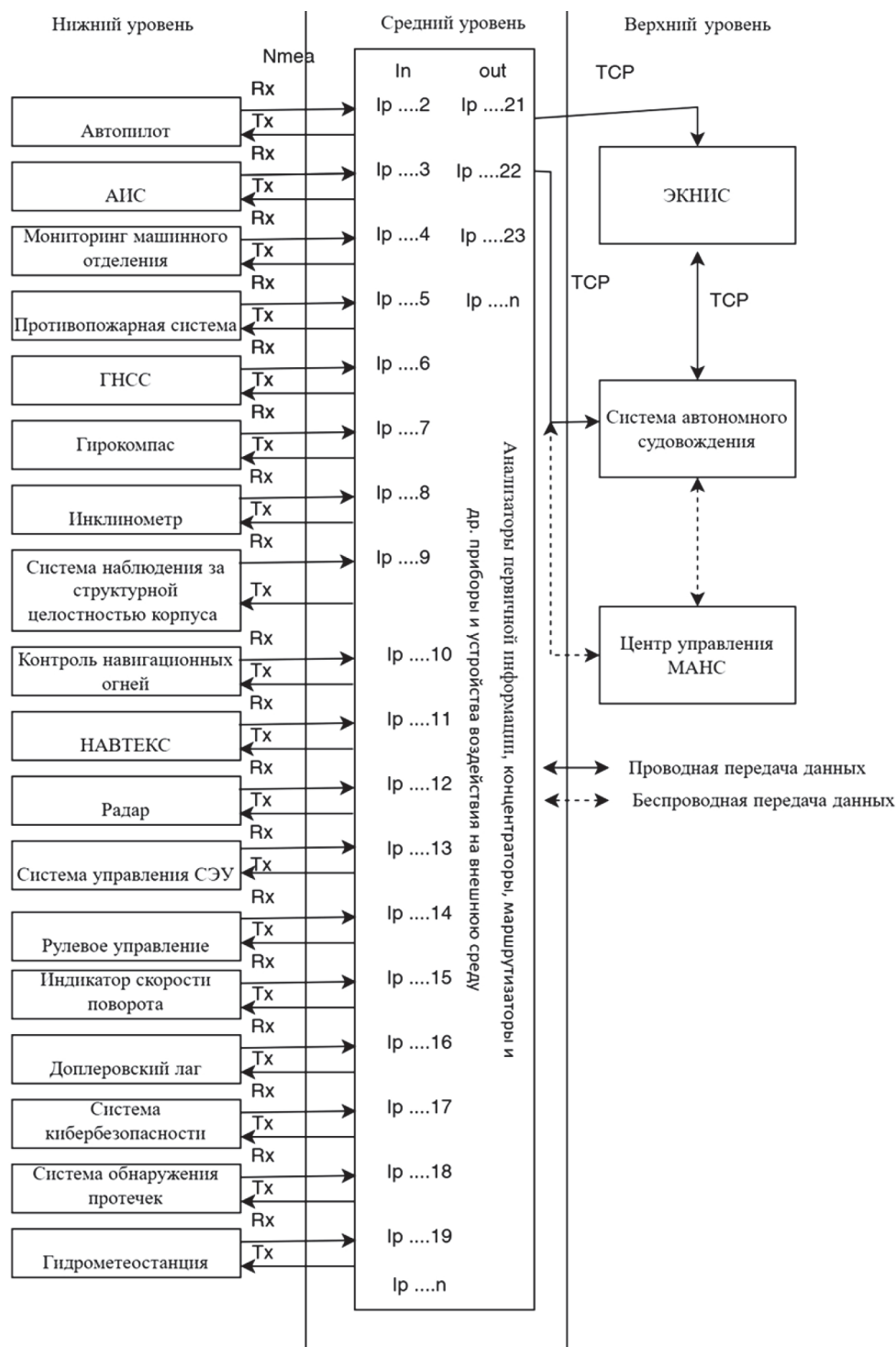


Рис. 3. Трехуровневая организация структуры
Fig. 3. Three-level structural organization

Рассмотрим работу системы автоматического управления движением судна с оценкой внешнего возмущения. Судоводитель устанавливает заданное направление движения судна $\varphi_{зд}$ (генеральный курс), используя рулевое управление и тем самым вводя сигнал заданного значения курса на вход анализатора первичной информации, на входы которого поступают сигналы: φ , ω — курса и угловой скорости с выхода датчиков; δ — угол перекладки руля с выхода датчика рулевого управления; $\varphi_{корр. ср}$ — сигнал оценки внешнего возмущения с выхода блока оценки внешнего возмущения; $\varphi_{зд}$ — заданный курс, поступающий с датчика курса $\varphi_{зд}$; θ_k — крен, θ_d — дифферент.

Таким образом, при отсутствии внешних возмущений, т. е. $K_1 \cdot \varphi_{\text{корр.ср}} = 0$, в регуляторе формируется типовой ПД-закон управления рулевым приводом судна $d\delta/dt$:

$$\frac{d\delta}{dt} = K_1 (\varphi - \varphi_{\text{зд}}) + K_2 \omega - K_3 \delta. \quad (1)$$

Добавляя использование крена, формула (1) принимает следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \delta = K_1 (\varphi - \varphi_{\text{зд}}) + K_2 \omega + K_1 \varphi_{\text{корр.ср}} + K_6 \theta_{\text{к}} + K_7 \frac{d\theta_{\text{roll}}}{dt} + K_8 \theta_{\text{д}} - K_3 \delta. \quad (2)$$

Благодаря использованию информации о крене и дифференте судна можно добиться компенсации боковой и килевой качки. Коэффициенты $K_6 - K_8$, определяемые экспериментально или по результатам моделирования, обеспечивают пропорционально-дифференциальную реакцию на углы пространственной ориентации и опережающую (feed-forward) коррекцию по волнению.

Формирование оценки среднего значения внешних возмущений осуществляют в блоке анализатора первичной информации циклически в интервале времени Δt . В момент времени T_0 появляется внешнее возмущение, воздействующее на процесс движения судна и определяемое анализатором первичной информации. Формируется разность $(\varphi - \varphi_{\text{зд}})$, используя которую и постоянные $C_2 > C_1$, $-C_1 > -C_2$, формируют условие:

$$C_2 > \varphi - \varphi_{\text{зд}} > C_1 \quad \text{или} \quad -C_2 \leq \varphi - \varphi_{\text{зд}} \leq -C_1. \quad (3)$$

Если выполняется условие (3), то сигнал разности $(\varphi - \varphi_{\text{зд}})$ поступает через анализатор первичной информации на вход в систему автономного судовождения и обратно в системы и датчики на нижнем уровне.

Через интервал времени Δt в момент времени $T_1 = T_0 + \Delta t$ с выхода анализатора первичной информации сигнал

$$\int_{T_5}^{T_6} \frac{\varphi - \varphi_{\text{зд}}}{T_{\text{инер.р}} + 1} dt$$

поступает на вход блока анализатора первичной информации, где преобразуется в сигнал среднего значения оценки внешних возмущений $\varphi_{\text{корр.ср}}$ на отрезке времени $\Delta t = T_1 - T_0$:

$$\varphi_{\text{корр.ср}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{T_0}^{T_1} \frac{\varphi - \varphi_{\text{зд}}}{T_{\text{инер.р}} + 1} dt. \quad (4)$$

Сигнал среднего значения оценки внешних возмущений $\varphi_{\text{корр.ср}}$ с выхода анализатора первичной информации поступает на вход системы автономного судовождения, где при этом формируется закон управления (2).

В момент времени $T_2 = T_1 + \Delta t$ в блоке анализатора первичной информации формируются разность $(\varphi - \varphi_{\text{зд}})$ и условие (3). Если условие выполняется, то сигнал разности поступает через инерционное звено на вход интегратора. Через интервал времени Δt в момент времени $T_3 = T_2 + \Delta t$ с выхода интегратора сигнал

$$\int_{T_2}^{T_3} \frac{\varphi - \varphi_{\text{зд}}}{T_{\text{инер.р}} + 1} dt$$

поступает на вход блока оценки внешнего возмущения, где преобразуется в сигнал $\varphi_{\text{корр.ср}}$ на отрезке времени $\Delta t = T_3 - T_2$ согласно зависимости (4). При этом в системе формируется закон управления движением судна (2) со средним значением коррекции курса $\varphi_{\text{корр.ср}}$.

В момент времени $T_4 = T_3 + \Delta t$ в анализаторе первичной информации формируется разность $(\varphi - \varphi_{\text{зд}})$. Если условие (3) не выполняется, то в момент времени $T_5 = T_4 + \Delta t$ процесс повторяется. При выполнении условия (3) в момент времени $T_6 = T_5 + \Delta t$ сигнал

$$\int_{T_5}^{T_6} \frac{\varphi - \varphi_{зд}}{T_{инер.р} + 1} dt$$

поступает на вход анализатора, где формируется очередное значение

$$\varphi_{корр.ср} = \frac{1}{\Delta t} \int_{T_5}^{T_6} \frac{\varphi - \varphi_{зд}}{T_{инер.р} + 1} dt. \quad (5)$$

Сигнал $\varphi_{корр.ср}$ поступает на вход системы автономного судовождения, где формируется закон управления (2) с текущим значением коррекции курса. В свою очередь анализатор первичной информации подает согласованный сигнал на рулевое управление для изменения положения руля и корректировки пространственного положения судна. Дополнительная информация о крене θ_k , дифференте θ_d и параметрах волнения обеспечивает упреждающую компенсацию качки, повышая точность и стабильность удержания курса в условиях внешних возмущений.

Выводы (Conclusions)

В результате проведенного исследования выполнено следующее:

1. Предложена трехуровневая иерархическая структура САУ морских автономных надводных судов (МАНС), учитывающая внешние воздействия окружающей среды (волнение, ветер, течения).
2. Разработан принцип циклической оценки среднего значения внешнего возмущения $\varphi_{корр.ср}$ и модифицированный пропорционально-дифференциальный закон управления рулевым приводом с дополнительными членами компенсации крена, дифферента и опережающей коррекции по волнению. Предложенные решения позволяют компенсировать влияние внешних возмущений, снижать ошибку удержания заданного курса и повышать точность и качество автоматического управления.
3. Предложенная структура обладает высокой надёжностью, открытостью к модернизации, масштабируемостью (возможностью изменения номенклатуры и количества датчиков) и удобством интеграции с внешними системами (СУДС, АСУ ДС и др.). Дополнительный контроль параметров мореходности (период рыскания, периоды бортовой и килевой качки) реализован без увеличения количества датчиков нижнего уровня первичной информации.
4. Дальнейшие исследования целесообразно направить на верификацию предложенной структуры на натурных и полунатурных стендах, разработку более детализированной математической модели, численное и экспериментальное подтверждение эффективности модифицированного закона управления, а также сбор данных для верификации работы системы в реальных гидрометеорологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буцанец А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Буцанец. — Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адм. С. О. Макарова», 2021. — 189 с. — EDN MFMQJR.
2. Михалевич И. Ф. Теоретические основы и прикладные методы обеспечения безопасности интеллектуальных систем водного транспорта: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук; специальность: 2.9.8. «Интеллектуальные транспортные системы» / И. Ф. Михалевич. — Москва: «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), 2024. — 568 с.
3. Устинов В. В. Проблемы создания МАНС и концептуальные пути их решения на этапе технического задания и проектирования под надзором РМРС в свете Положения по классификации морских автоном-

ных и дистанционно управляемых надводных судов / В. В. Устинов // Транспортное дело России. — 2021. — № 2. — С. 147–150. — EDN VNHXTJ. DOI: 10.52375/20728689_2021_2_147.

4. Литов Д. В. Некоторые аспекты построения структуры системы управления морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) / Д. В. Литов, О. С. Хватов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 35–43. — EDN YRHQTS.

5. Zhukov V. Monitoring systems of ship power plants during operation / V. Zhukov, A. Butsanets, S. Sherban, V. Igonin // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 982. — Pp. 419–428. — EDN SLRGCX. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_40.

6. Степанова В. И. Единая система мониторинга, диагностики и тестирования оборудования на МАНС: принцип реализации и возможности / В. И. Степанова, С. В. Смоленцев // Актуальные решения проблем водного транспорта: сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Астрахань, 29 мая 2023 года. — Астрахань: Индивидуальный предприниматель Сорокин Роман Васильевич (Издатель: Сорокин Роман Васильевич), 2023. — С. 411–416. — EDN TJXOFN.

7. Issa M. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process / M. Issa, A. Ilinca, H. Ibrahim, P. Rizk // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 23. DOI: 10.3390/su142315630.

8. Брыляков А. В. Анализ особенностей дистанционного управления морским автономным надводным судном в портовых водах с использованием конвенциональных навигационных технических средств / А. В. Брыляков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 195–207. — EDN GRSFHH. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-172-195-207.

9. Волков В. В. Модели кибератак на сеть автоматической идентификационной системы / В. В. Волков, Е. О. Ольховик, Ю. С. Федосенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 641–652. — EDN DKQYLH. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-641-652.

10. Андриевский Б. Р. Методы искусственного интеллекта в системах навигации / Б. Р. Андриевский, Н. В. Кузнецов, Е. В. Кудряшова [и др.] // Дифференциальные уравнения и процессы управления. — 2025. — № 4. — С. 94–142.

11. Смоленцев С. В. Алгоритм анализа данных автоматической идентификационной системы для выделения типовых сценариев расхождения судов и тестирования систем автономного судовождения / С. В. Смоленцев, А. А. Буцанец, С. Ф. Шахнов [и др.] // T-Comm. — 2024. — Т. 18. — № 3. — С. 50–59. — EDN TYZNSI. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59.

12. Butsanets A. Development of Technical Means for Mooring the Unmanned Vessels / A. Butsanets, E. Ol'khovik // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) — 2019. — Pp. 1–3. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934708.

13. Кудров М. А. Постановка задачи управления автономным надводным судном для внутренних водных путей / М. А. Кудров, К. Д. Бухаров, Д. Р. Махоткин, Р. С. Айвазов // Мир транспорта. — 2023. — Т. 21. — № 3(106). — С. 36–41. — EDN RHICRB. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-3-2.

14. Karetnikov V. Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator / V. Karetnikov, E. Ol'Khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. — Springer Nature Singapore, 2021. — Pp. 146–156. — EDN JJVLQH. DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_1.

15. Скороходов Д. А. Алгоритм обеспечения безопасности навигации судов на мелководье и в стесненных акваториях / Д. А. Скороходов, В. Ю. Каминский // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 3–1(69). — С. 280–287. — EDN XXHERJ. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.047.

16. Баранов Л. А. On trust in autonomous shipping systems of critical information infrastructure / Л. А. Баранов, И. Ф. Михалевиц // T-Comm. — 2025. — Т. 19. — № 6. — С. 52–59. — EDN MLCXNO. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-6-52-59.

REFERENCES

1. Butsanets, A. A. Organizatsiya sistemy distantsionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskim flotom dlya obespecheniya sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh. PhD diss. St. Petersburg, 2021.

2. Mikhalevich Igor' Feodos'evich Teoreticheskie osnovy i prikladnye metody obespecheniya bezopasnosti intellektual'nykh sistem vodnogo transporta. Grand PhD diss. Moskva, 2024.

3. Ustinov, V. V. "Problems of creating mans and conceptual ways to solve them at the stage of technical specifications and design under the supervision of rmrs in the light of the provisions on the classification of marine autonomous and remotely controlled surface vessels." *Transport Business in Russia* 2 (2021): 147–150. DOI: 10.52375/20728689_2021_2_147.
4. Litov, D. V. and O. S. Khvatov. "Some aspects of control system structure building for maritime autonomous and remotely controlled surface ships (mass)." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 78 (2025): 35–43.
5. Zhukov, V., A. Butsanets, S. Sherban and V. Igonin. "Monitoring systems of ship power plants during operation." *Advances in Intelligent Systems and Computing* 982 (2020): 419–428. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_40.
6. Stepanova, V. I. and S. V. Smolentsev. "Unified system for monitoring, diagnostics and testing of equipment at mass: implementation principle and opportunitiesthe." *Aktual'nye resheniya problem vodnogo transporta: sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Astrakhan', 29 maya 2023 goda. Astrakhan': Individual'nyy predprinimatel' Sorokin Roman Vasil'evich (Izdatel': Sorokin Roman Vasil'evich), 2023: 411–416.*
7. Issa, M., A. Ilinca, H. Ibrahim and P. Rizk. "Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process." *Sustainability* 14.23 (2022). DOI: 10.3390/su142315630.
8. Brylyakov, A. V. "Analysis of the features of remote control of a marine autonomous surface ship in port waters using conventional navigation technical means." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 195–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-195-207.
9. Volkov, V. V., E. O. Ol'khovik and Yu. S. Fedosenko. "Models of cyberattacks on the automatic identification system network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 641–652. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-641-652.
10. Andrievskiy, B. R., et al. "Metody iskusstvennogo intellekta v sistemakh navigatsii." *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya* 4 (2025): 94–142.
11. Smolentsev, S. V., A. A. Butsanets and S. F. Shakhnov et al. "Algorithm for analyzing the automatic identification system data to identify typical scenarios for vessel divergence and testing the systems of autonomous shipping." *T-Comm* 18.3 (2024): 50–59. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59.
12. Butsanets, A. and E. Ol'khovik. "Development of Technical Means for Mooring the Unmanned Vessels." *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. — 2019: 1–3. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934708.
13. Kudrov, M. A., K. D. Bukharov, D. R. Makhotkin and R. S. Ayvazov. "Statement of the problem of control of an autonomous surface vessel for inland waterways." *World of Transport and Transportation* 21.3(106) (2023): 36–41. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-3-2.
14. Karetnikov, V. and E. Ol'Khovik, A. Butsanets, A. Ivanova. "Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. Springer Nature Singapore, 2021: 146–156. DOI: 10.1007/978-981-33-6208-6_1.*
15. Skorokhodov, D. A. and V. Yu. Kaminskiy. "An algorithm for ensuring the safety of navigation of vessels in shallow water and in confined waters." *Marine Intellectual Technologies* 3–1(69) (2025): 280–287. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.047.
16. Baranov, L. A. and I. F. Mikhalevich. "On trust in autonomous shipping systems of critical information infrastructure." *T-Comm* 19.6 (2025): 52–59. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-6-52-59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буцанец Артем Александрович — кандидат технических наук, начальник отдела НТИ и ИС ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru
Беспалов Александр Павлович — аспирант ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: bespalovap@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Butsanets, Artem A. — PhD in Technical Sciences, Head of the Department
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru
Bespalov, Aleksandr P. — postgraduate student
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: bespalovap@gumrf.ru

Жидкова Анастасия Михайловна —
руководитель проектов
ФГУП «Крыловский государственный научный
центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: a_zhidkova@ksrc.ru

Zhidkova, Anastasia M. —
project manager
Krylov State Research Center
44, Moskovskoe shosse,
St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: a_zhidkova@ksrc.ru

*Статья поступила в редакцию: 29 января 2026 г.
Received: Jan. 29, 2026.*

Научное издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 18. № 2

2026 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать 27.04.26. Дата выхода в свет 30.04.26
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 24,25.
Тираж 500 (первый завод 30) экз. Свободная цена. Заказ № 152/26

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2

Отпечатано на полиграфической базе издательства ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2