

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 17. № 5

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025**

12+

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — Т. 17. — № 5. — 158 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

В «Вестнике» публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов докторантурных 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



9 772309 518784 >

© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 629

Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Бобырь Н. Ю. Перспективы использования электроцилиндров для подъемно-транспортного оборудования.....	629
Волков В. В., Ольховик Е. О., Федосенко Ю. С. Определение долготы места судна по глубинам на основе нейронной сети.....	641
Ююкин И. В. Комплексирование методов сплайн-функций и нечеткой логики для решения сложных задач судовождения.....	653
Галин А. В., Хватов Г. М. Определение долготы места судна по глубинам на основе нейронной сети.....	672
Прозоров К. В., Сперанская Я. А., Слицан А. Е. Исследование влияния отдельных факторов на уровень фрахтовой ставки.....	682
Юдин Ю. И. Сравнительный анализ методов расчета гидродинамических характеристик корпуса судна.....	691
Фирсов Ю. Г. Анализ проблем второй версии шестой редакции Стандартов S-44 Международной гидрографической организации.....	704
Бурылин Я. В., Жук С. С., Буцанец А. А. Модель жизненного цикла буксира-автомата в системе обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морском порту.....	717

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ... 728

Москаленко М. А., Черняхович С. Е., Тузюк И. В. Выбор методов изготовления корпусных конструкций судов из полимерных композиционных материалов.....	728
Мочалин К. С., Приваленко А. А., Синицин В. И. Разработка метода ускоренных коррозионно-эрозионных испытаний выпускных клапанов судовых дизелей с применением статистического планирования эксперимента	738

Том 17. № 5

2025

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ

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. Гарифин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голосков,
д-р техн. наук, проф.

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

<i>В. Л. Ерофеев,</i> д-р техн. наук, проф.	<i>Житников А. А., Марченко А. А.</i> Прототип устройства идентификации неисправности в информационно-измерительном канале датчика давления.....	747
<i>В. А. Жуков,</i> д-р техн. наук, доц.		
<i>Ю. М. Искандеров,</i> д-р техн. наук, проф.	АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ.....	756
<i>В. В. Каратников,</i> д-р техн. наук, доц.	<i>Милушков В. И.</i> Модель автоматизированной системы контроля качества изделий на основе нейросетей с неконтролируемым и частично контролируемым обучением	756
<i>А. В. Кириченко,</i> д-р техн. наук, проф.	<i>Лиманский Н. Н.</i> Модель обнаружения аномалий на основе обучения без учителя для многомерных временных рядов технологических параметров промышленных объектов	768
<i>М. Н. Кирсанов,</i> д-р физ.-мат. наук, проф.		
<i>Е. А. Королева,</i> д-р экон. наук, проф.		
<i>И. И. Костылев,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>А. Л. Кузнецов,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>В. А. Логиновский,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>А. В. Макшанов,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>В. Е. Марлей,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>Т. А. Пантина,</i> д-р экон. наук, проф.		
<i>В. И. Решняк,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>А. В. Саушеев,</i> д-р техн. наук, доц.		
<i>С. В. Смоленцев,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>С. С. Соколов,</i> д-р техн. наук, доц.		
<i>М. В. Сухотерин,</i> д-р техн. наук, доц.		
<i>А. Л. Тезиков,</i> д-р техн. наук, проф.		
<i>А. А. Чертков,</i> д-р техн. наук, доц.		

CONTENTS

Volume 17. № 5

2025

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

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 629

- Zub I. V., Ezov Yu. E., Bobyr N. Yu.* Prospects for the use of electric cylinders in lifting and transport equipment 629
- Volkov V. V., Ol'khovik E. O., Fedosenko Yu. S.* Models of cyberattacks on the automatic identification system network 641
- Yuyukin I. V.* Integration of spline function methods and fuzzy logic for solving complex navigation problems 653
- Galin A. V., Khvatov G. M.* Optimization of the truck discharge zone of an oil terminal using discrete-event simulation 672
- Prozorov K. V., Speranskaya Y. A., Slitcan A. E.* Investigation of the influence of individual factors on the level of freight rates 682
- Yudin Y. I.* Comparative analysis of methods for calculating the hydrodynamic characteristics of a ship's hull 691
- Firsov Y. G.* Analysis of key issues in version 6.2.0 of the sixth edition of the IHO S-44 standards for hydrographic surveys 704
- Burylin Y. V., Zhuk S. S., Butsanets A. A.* Model of the life cycle of an automated tugboat in the system of autonomous ship guiding and mooring in a seaport 717

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION 728

- Moskalenko M. A., Chernyakhovich S. E., Tuzyuk I. V.* The choice of methods for manufacturing hull structures of ships from polymer composite materials 728
- Mochalin K. S., Privalenko A. A., Sinitzin V. I.* Development of an accelerated corrosion-erosion testing method for marine diesel exhaust valves using statistical experimental design 738
- Zhitnikov A. A., Marchenko A. A.* Prototype of a fault identification device in the information and measurement channel of a pressure sensor 747

<i>V. L. Erofeev,</i> Doctor of Technical Sciences	AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION 756
<i>V. A. Zhukov,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Milushkov V. I.</i> Model of an automated product quality control system based on neural networks with unsupervised and semi-supervised learning 756
<i>V. V. Karetnikov,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Limansky N. N.</i> Anomaly detection model based on unsupervised learning for multivariate industrial time series 768
<i>A. V. Kirichenko,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>M. N. Kirsanov,</i> Doctor of Phys.-Math. Sciences	
<i>E. A. Koroleva,</i> Doctor of Economic Sciences	
<i>I. I. Kostylev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. L. Kuznetsov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. A. Loginovskiy,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. V. Makshanov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. Ye. Marley,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>T. A. Pantina,</i> Doctor of Economic Sciences	
<i>V. I. Reshnyak,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. V. Saushev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>S. V. Smolentsev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>S. S. Sokolov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>M. V. Sukhoterin,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. L. Tezikov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. A. Chertkov,</i> Doctor of Technical Sciences	

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-629-640

EDN CCXMJX

PROSPECTS FOR THE USE OF ELECTRIC CYLINDERS IN LIFTING AND TRANSPORT EQUIPMENT

I. V. Zub, Yu. E. Ezhov, N. Yu. Bobyr

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

Based on an analysis of scientific publications, this review article substantiates the need to implement effective technologies aimed at reducing greenhouse gas emissions, primarily carbon dioxide, which have a detrimental impact on global climate change. Particular attention is given to the negative environmental effects of lifting and transport equipment and terminal tractors used at large terminals. It is noted that, in this context, terminal operators are increasingly adopting hybrid engines, environmentally friendly fuels, or electrically powered equipment. Evidence is presented that the transition to lifting and transport equipment powered by electric energy sources can not only reduce greenhouse gas emissions during port operations but, due to the simpler mechanical design of electric drives, also improve equipment uptime and lower maintenance costs. In addition to replacing internal combustion engines, it is necessary to modernize hydraulic systems — particularly in reach stackers, which are among the most complex types of handling equipment (the hydraulic systems of reach stackers contain approximately 800 liters of hydraulic fluid). It is proposed to replace hydraulic cylinders, which are the main consumers of hydraulic energy during cargo handling operations, with electric cylinders. These components are comparable in operational loads to hydraulic cylinders; moreover, when internal combustion engines are replaced by battery systems, the total cost of ownership is reduced and positioning accuracy is improved.

Keywords: lifting and transport equipment, electric cylinders, hydraulic cylinders, energy efficiency, environmental sustainability, materials handling engineering, hybrid drive, cyclic operation, high-speed performance, positioning accuracy.

For citation:

Zub, Igor V., Yu. E. Ezov and N. Yu. Bobyr "Prospects for the use of electric cylinders in lifting and transport equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 629–640. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-629-640.

УДК 62-835: 627.352.2

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЦИЛИНДРОВ ДЛЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Бобырь Н. Ю.

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

В обзорной статье на основе анализа научных публикаций дано обоснование необходимости внедрения эффективных технологий, способствующих снижению выбросов парниковых газов, в первую очередь углекислого газа, оказывающих отрицательное влияние на изменение климата на Земле. В частности, обращается внимание на негативное влияние подъемно-транспортного оборудования и терминальных тягачей, используемых на крупных терминалах. Отмечается, что в связи с этим терминальные операторы переходят на гибридные двигатели, экологичные виды топлива или электрическое оборудование. Приведены доказательства того, что переход на использование подъемно-транспортного оборудования, оснащенного электрическими источниками энергии, не только снизит выбросы парниковых газов в атмосферу при работе в порту, но и благодаря более простой механической конструкции электроприводов увеличит время безотказной работы оборудования, а также позволит сократить затраты на его техническое обслуживание.

Обоснована необходимость кроме замены двигателя внутреннего сгорания, произвести замену элементов гидравлической системы, в частности, на ричстакерах, которые являются наиболее сложными устройствами (объем гидравлической жидкости в гидравлических системах ричстакера составляет порядка 800 л). Предлагается замена гидравлических цилиндров как основных потребителей гидравлической энергии при выполнении погрузочно-разгрузочных работ на электроцилиндры, так как они не отличаются по эксплуатационным нагрузкам от гидравлических цилиндров, и в случае замены двигателей внутреннего сгорания на аккумуляторные батареи снижаются эксплуатационные расходы (стоимость владения), а также обеспечивается точность позиционирования.

Ключевые слова: подъемно-транспортное оборудование, электроцилиндры, гидроцилиндры, энергоэффективность, экологичность, подъемно-транспортное машиностроение, гибридный привод, циклическое действие, быстродействие, точность позиционирования.

Для цитирования:

Зуб И. В. Перспективы использования электроцилиндров для подъемно-транспортного оборудования / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Н. Ю. Бобырь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 629–640. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-629-640. — EDN CCXMJX.

Введение (Introduction)

Снижение выбросов парниковых газов, в первую очередь углекислого газа (CO_2), рассматривается как одно из направлений борьбы с изменением климата на Земле. Модификация подъемно-транспортного оборудования (ПТО), использующего в качестве источника энергии электроэнергию, является актуальной задачей подъемно-транспортного машиностроения. ПТО с электроприводом не только сокращает углеродный след, снижает выбросы CO_2 на 120 т/год для одного терминала, но и является экономически выгодным: совокупные затраты на электроэнергию оказываются на 40 % ниже, чем расходы на дизельное топливо [1, 2]. Кроме гибридных приводов, используемых в оборудовании циклического действия, применение находит электропривод, обладающий высокой точностью позиционирования и быстродействием. В свою очередь электрические и гибридные приводы заменяют гидравлические приводы [3].

В настоящее время на терминалах находятся в эксплуатации электрофицированные ричстакеры и терминальные тягачи, которые в качестве источников энергии используют аккумуляторные батареи (АКБ). Используемая электроэнергия АКБ практически не выделяет углекислого газа (CO_2) и вызывает интерес к использованию электрофицированного подъемно-транспортного оборудования (ПТО). В качестве АКБ применяют литий-ионные батареи, основными недостатками которых являются снижение емкости в процессе заряда-разряда, длительный процесс заряда, саморазряд при хранении при пониженных температурах, склонность к саморазогреву в результате нарушения температурного режима [4].

Замена источника энергии с дизельного на электрический не снижает экологической безопасности, так как ПТО остаются оборудованными гидравлическими системами, которые являются источником экологических и эксплуатационных рисков и затрат. Утечки гидравлической жидкости, необходимость обслуживания элементов гидравлической системы, а также влияние температуры на вязкость рабочей жидкости снижают надежность оборудования [5].

Замена гидравлического оборудования на электромеханическое происходит во многих производственных областях: станкостроении, горнодобывающем и транспортном оборудовании. Наиболее распространенным электромеханическим приводом является электроцилиндр [6–11]. Несмотря на то, что стоимость гидравлических цилиндров ниже чем электроцилиндров, для приведения их в движение необходимо дополнительное оборудование [12, 13]. При работе ричстакера с крупнотоннажными контейнерами гидравлические цилиндры демпфируют пиковые нагрузки, замедляя раскачивание спредера с подвешенным крупнотоннажным контейнером. При проектировании электроцилиндров используются серийно развитые узлы, в то время как при проектировании гидравлических цилиндров существует гораздо большее количество вариантов для конструкторского решения [9].

Целью работы является исследование вопросов анализа и обоснования замены гидравлических цилиндров на электроцилиндры для ПТО на основе имеющихся данных отечественной и зарубежной научно-технической литературы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Терминальные операторы решают вопросы модернизации ПТО для повышения их экономической эффективности и соответствия экологическим стандартам [14]. Основные затраты в процессе эксплуатации ПТО связаны с техническим обслуживанием и ремонтом (ТО и Р) гидравлических систем и двигателей внутреннего сгорания. Переход на электродвигатели и замена гидроцилиндров на электроцилиндры (рис. 1) позволяют снизить стоимость владения (в частности, расходы на поддержание техники в работоспособном состоянии) за счет сокращения затрат на ТО и Р, сократить вредные выбросы в атмосферу от сгорания дизельного топлива, при этом отпадает необходимость утилизации гидравлического масла [15]. При работе электрофицированного ПТО возможна рекуперация электроэнергии, которая при стандартных условиях работы может увеличить время автономной работы ПТО на 15–20 %. Рекуперация осуществляется при скольжении и при торможении. Низкое энергопотребление снижает эксплуатационные расходы и, соответственно, себестоимость погрузочно-разгрузочных работ.

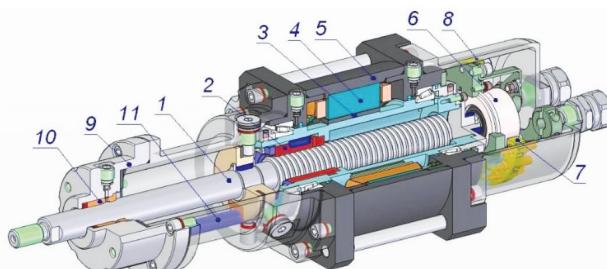


Рис. 1. Устройство электроцилиндра 1 — шток; 2 — гайка; 3 — магнит; 4 — статор встроенного электродвигателя; 5 — наружный корпус; 6 — резольвер (датчик углового положения); 7 — клемма присоединения кабеля силового преобразователя для управления вращением гайки; 8 — клемма присоединения кабеля датчика углового положения; 9 — крышка штока; 10 — бронзовый подшипник скольжения; 11 — направляющая для предотвращения проворачивания штока
(https://elektromehanicka.narod.ru/HTMLsEN/3_4en.html)

Переход на электромеханическое оборудование представляет собой комплексное решение, сочетающее экологическую безопасность, энергоэффективность и экономическую целесообразность. Однако для успешной реализации таких проектов необходима разработка единых нормативов, регулирующих проектирование и техническую эксплуатацию электроцилиндров [14, 16]. Электроцилиндры, в отличие от гидравлических аналогов, полностью исключают использование нефтепродуктов, что соответствует глобальной тенденции на внедрение «зеленых» технологий. Они обеспечивают высокую точность позиционирования (до 1 мк), низкий уровень шума и вибраций, а также устойчивость к температурным колебаниям — допускаемый рабочий температурный диапазон для электроцилиндров от -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$ [8, 16].

Оснащенное электродвигателями ПТО функционирует за счет преобразования электрической энергии в механическое движение. Электроэнергия для заряда ПТО рассчитывается по формуле [17]:

$$N_{\text{cp}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{AB}}}{(1 - \Delta\mathcal{E}_{\text{CH}})(1 - \Delta\mathcal{E}_{\text{сети}})(1 - \Delta\mathcal{E}_{\text{AB}})T_r}, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_{AB} — годовая энергия заряда аккумуляторных батарей электротранспорта; T_r — число часов в году; $\Delta\mathcal{E}_{\text{AB}}$ — потери электроэнергии на электрозаправочной станции; $\Delta\mathcal{E}_{\text{сети}}$ — потери электроэнергии при передаче в электрических сетях; $\Delta\mathcal{E}_{\text{CH}}$ — расход электроэнергии на собственные нужды электростанции.

Анализ российских [10, 16, 18–22] и зарубежных [1, 2, 23–27] источников показал преимущества электроцилиндров по сравнению с гидроцилиндрами. Электроцилиндр оснащен преобразователем, который служит в качестве датчика скорости и положения. Наработка на отказ электроцилиндров составляет 70–200 тыс. ч (8–25 лет) при минимальных требованиях к техническому обслуживанию. Скорость выдвижения штока составляет до 1,5 м/с, при усилии до 1000 кН (100 т) ход штока составляет до 9 м. Важной особенностью электроцилиндров является точность позиционирования, которая составляет единицы микрон, а КПД электроцилиндра — более 85 % (порядка 90 %). При изменении нагрузки изменяется потребление тока. При постоянной нагрузке потребление электроэнергии ПТО минимальное [18].

Срок службы электроцилиндра (L_n) зависит от нагрузки и циклов перемещения:

$$L_n = \frac{L}{60n_m}, \quad (2)$$

где n_m — средняя скорость вращения [мин^{-1}]; L — срок службы электроцилиндра, об.

Срок службы электроцилиндра L , об., определяется в виде

$$L = \left(\frac{C}{1,1F} \right)^3 10^6, \quad (3)$$

где C — номинальная динамическая нагрузка [Н], которая зависит от модели электроцилиндра.

Средняя нагрузка F , Н, определяется по формуле

$$F = \sqrt[3]{F_1^3 \frac{q_1}{100} + F_2^3 \frac{q_2}{100} + \dots + F_n^3 \frac{q_n}{100}}, \quad (4)$$

где F_1 – F_n — усилие подачи при перемещении электроцилиндра [Н]; q_1 – q_n — доля времени в процентах от общего времени погрузочно-разгрузочных работ.

На ричстакерах объем гидравлической жидкости в среднем составляет 800 л в зависимости от модели ричстакера. Гидравлическая система, несмотря на проверенную временем надежность, требует регулярной замены масла в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя, через 2000 мото-ч. В среднем в течение года происходит две замены контроля качества гидравлической жидкости и ремонта элементов, что увеличивает эксплуатационные расходы на 20–30 % [28, 29].

Отработанную гидравлическую жидкость необходимо утилизировать. На отказы гидравлической системы ПТО по статистике приходится 40 %. Главным преимуществом электрических систем является их автономность. В отличие от гидравлики, где рабочая жидкость требует регулярной замены и утилизации, электроцилиндры используют только электроэнергию, которая может быть получена из возобновляемых источников. Это позволяет не только снизить зависимость от природных ресурсов, но и минимизировать риски загрязнения окружающей среды на всех этапах жизненного цикла оборудования.

Электромеханический цилиндр представляет собой линейный механический привод, состоящий из двух частей: серводвигателя и датчика обратной связи, в котором использована ролико-винтовая или шарико-винтовая передача [13] (рис. 2). Принцип работы устройства заключается в преобразовании вращательного движения электродвигателя в поступательное перемещение штока.

Шарико-винтовая передача (ШВП) по своим характеристикам уступает ролико-винтовой передаче (РВП), так как шарики контактируют друг с другом, что вызывает паразитное трение, их износ и нагрев. При частоте вращения 1000 мин^{-1} возникает вибрация. Еще одним недостатком ШВП является неприспособленность к пиковым нагрузкам и проведению мероприятий по техническому обслуживанию. Планетарная РВП, как и ШВП, является передачей винт – гайка. Контактная поверхность планетарных роликов РВП при работе в 15 раз больше, они передают усилия, большие,

чем в ШВП. Такие электроцилиндры обладают высоким КПД и точностью позиционирования 0,1 мм [6, 7, 13].

Управление электродвигателем осуществляется частотным преобразователем, обеспечивающим регулирование скорости вращения вала, что, в свою очередь, определяет скорость перемещения штока цилиндра. В конструкции электроцилиндров предусмотрены дисковые тормоза с электромагнитным приводом [1], обеспечивающие дополнительную безопасность и надежность системы.



Rис. 2. Электромеханический привод:
а — ролико-винтовая передача; б — шарико-винтовая передача

Сравнивать электро- и гидроцилиндры цилиндры можно только в случае их идентичных технических характеристик, к которым относится развиваемое усилие F , скорость движения S , точность позиционирования Π_t . При выборе электро- или гидроцилиндра будет использован критерий выбора k_b , отвечающий следующим условиям:

$$k_b = \begin{cases} F \rightarrow \max; \\ S \rightarrow \max; \\ \Pi_t \rightarrow 10^{-6} \text{ м.} \end{cases} \quad (5)$$

Основные преимущества электроцилиндров по сравнению с гидроцилиндрами заключаются в следующем:

- высокая точность позиционирования штока, что важно для управления процессами погрузочно-разгрузочных работ;
- эксплуатация в диапазоне температур от -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$;
- одинаковые скорости перемещения на втягивание и выдвижение штока ввиду отсутствия различий в площадях штоковой и поршневой полостей;
- отсутствие утечки гидравлической жидкости, что положительно сказывается на экологической безопасности.

Результаты (Results)

Для анализа эффективности замены гидравлических цилиндров на электроцилиндры рассмотрим электрический ричстакер грузоподъемностью 45 т (рис. 3). Для полной замены гидравлических элементов на электроприводы необходимо модернизировать все компоненты ричстакера. В базовой версии работу гидравлической системы ричстакера обеспечивают следующие гидравлические элементы, которые можно заменить на электрические эквиваленты:

1. Два гидромотора поворота спредера 8.
2. Гидроусилитель руля [30].
3. Гидроцилиндры:
 - два гидроцилиндра подъема стрелы 1;
 - два гидроцилиндра наклона спредера (демпферная система успокоения колебаний спредера);

- гидроцилиндр выдвижения стрелы 6;
- гидроцилиндр двойного действия 7 (рулевой гидроцилиндр);
- два гидроцилиндра поворота штыков;
- два гидроцилиндра позиционирования спредера 9;
- два гидроцилиндра выдвижения телескопических секций (лап) спредера.

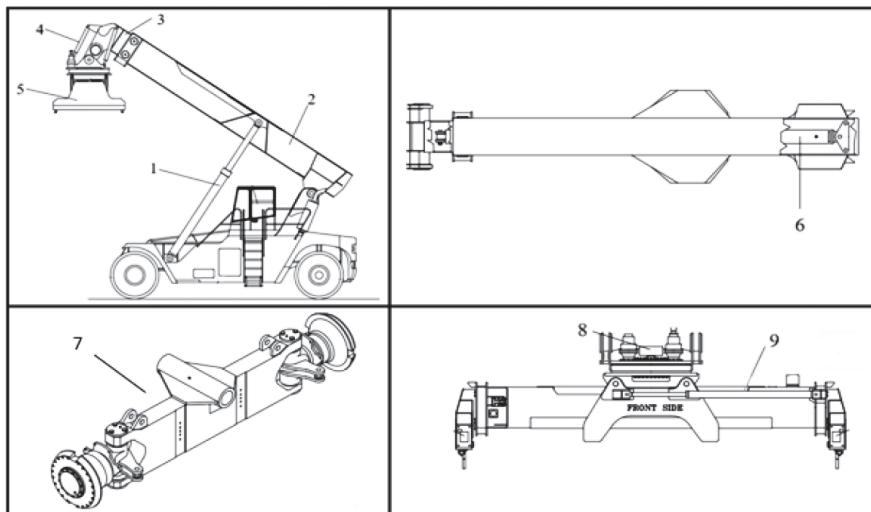


Рис. 3. Общий вид ричстакера и узлов гидросистемы с указанием его гидроцилиндров:
 1 — гидроцилиндры подъема стрелы; 2 — первая секция телескопической стрелы;
 3 — вторая секция телескопической стрелы; 4 — гидроцилиндры наклона спредера;
 5 — спредер; 6 — гидроцилиндр выдвижения стрелы; 7 — гидроцилиндр двойного действия
 (рулевой гидроцилиндр); 8 — гидромотор редуктора поворота спредера;
 9 — гидроцилиндры позиционирования спредера
 (<https://xcmg-rf.ru/product/richstaker-xcmg-xcs453le3>)

Гидроцилиндры наклона спредера 4 (см. рис. 3) выполняют роль демпфера — гасят колебания спредера при транспортировке крупнотоннажного контейнера. При наведении спредера для захвата контейнера, поверхность которого не имеет параллельности с горизонтами, гидроцилиндры наклона спредера обеспечивают необходимую степень свободы для наклона спредера на требуемый для захвата контейнера угол. При замене гидроцилиндров наклона на электроцилиндры без дополнительного оборудования спредер не будет обладать необходимой эксплуатационной гибкостью, что вызовет снижение скорости обслуживания транспортных средств. Для устранения этого недостатка электроцилиндры оборудованы лазерными датчиками [31, 32], установленными на спредере и определяющими расстояние до поверхности контейнера. При наличии разности расстояний подается сигнал на электроцилиндры, которые обеспечивают горизонтальное положение спредера относительно поверхности контейнера. В этом случае на паре штыков внешней или внутренней стороны спредера будет увеличенная нагрузка. На штыки устанавливаются датчиками нагрузки, от которых сигнал поступает в систему управления электроцилиндрами наклона, спредер возвращается в горизонтальное положение, и нагрузка от контейнера равномерно распределяется между штыками.

При замене двенадцати гидроцилиндров практически все они парные. Для замены гидравлических цилиндров необходимы электроцилиндры с различным развиваемым усилием и длиной выдвижения штока. Начальная стоимость таких электроцилиндров будет выше стоимости гидравлических цилиндров, но дальнейшая эксплуатация окупит начальные вложения. Проблемы возникнут при модернизации системы управления, поскольку на рулевом мосту установлен гидроцилиндр двойного действия, для замены которого необходимы конструктивные изменения.

За один час работы гидравлическая система ричстакера расходует 70 % на рабочие операции подъем / опускание и выдвижение / втягивание стрелы. Остальное время идет на поддержание рабочего давления, требующего 15 % пиковой мощности насоса.

Мощность гидравлического насоса N_h в кВт определяется по формуле

$$N_h = \frac{Qp}{612\eta}, \quad (6)$$

где Q — подача масла, л/мин; p — рабочее давление, бар; 612 — переводной коэффициент; η — КПД насоса.

Следовательно, среднее потребление в час электроэнергии в кВт для всех насосов ричстакера:

$$N_{HP} = \sum_1^n (N_h \alpha + N_h^2 + N_h v), \quad (7)$$

где n — количество насосов, $n = 3$; α — время, затраченное на рабочие операции; β — время, затраченное на поддержание рабочего давления в гидравлической системе; v — время работы насосов для поддержания рабочего давления.

Общее потребление гидравлической системы в кВт:

$$N_{GC} = N_{HP} + N_{gy,p} + N_{cpr}, \quad (8)$$

где $N_{gy,p}$ — энергопотребление гидроусилителя руля, кВт; N_{cpr} — энергопотребление гидроцилиндров выдвижения спредера и гидромотора редуктора поворота спредера, кВт.

Мощность в кВт для электроцилиндров:

$$N_e = \frac{M\omega}{9550\eta}, \quad (9)$$

где M — требуемый момент при максимальной нагрузки, Н; ω — скорость вращения двигателя, об/мин; 9550 — переводной коэффициент; η — КПД.

Следовательно, среднее потребление в час электроэнергии для всех электроцилиндров N_{ec} в кВт:

$$N_{ec} = \sum_1^n (P_e \alpha), \quad (10)$$

где n — количество электроцилиндров; α — коэффициент времени, затраченного на рабочие операции.

Общее потребление электроэнергии электрической системы ричстакера N_{ec} в кВт:

$$N_{ec} = N_{ec} + N_{gy,p} + N_{cpr}, \quad (11)$$

где $N_{gy,p}$ — энергопотребление электроусилителя руля, кВт; N_{cpr} — энергопотребление электроцилиндров выдвижения и электромотора редуктора поворота спредера, кВт.

Электрические цилиндры одновременно могут управлять положением, задавать ускорение штока, точно устанавливая величину усилия. По сравнению с гидравлическими цилиндрами в электрических больший КПД, так как исключена постоянная работа гидравлического насоса, который имеет привод от двигателя внутреннего сгорания. Это снижает выбросы выхлопных газов в атмосферу, вибрацию и шум, исключая тем самым вредные воздействия на оператора ричстакера.

Заключение (Conclusion)

Электромеханический привод имеет возможность интеграции в автоматизированные системы управления, что является особенно актуальным в условиях современной экономики, процессов импортозамещения и повышения требований к качеству погрузочно-разгрузочных работ [16]. Внедрение таких решений на терминалах позволит не только оптимизировать погрузочно-разгрузочные процессы, но и обеспечить конкурентоспособность терминала, способствуя его устойчивому развитию и достижению стабильных финансовых результатов за счет снижения эксплуатационных расходов.

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- электроцилиндры представляют собой наиболее перспективную, экономичную и надежную альтернативу гидравлическим цилиндрам.
- для обеспечения эффективного проектирования и выбора рабочих параметров электроцилиндров для ПТО необходим единый нормативный документ, учитывающий особенности эксплуатации;
- использование электроцилиндров позволит снизить эксплуатационные затраты, компенсирующие высокую начальную стоимость.

В свою очередь, гидравлический цилиндр имеет ряд преимуществ по сравнению с электрическим, в частности по номинальной тяге. При установке гидроаккумулятора поглощается пульсирующее гидравлическое давление и обеспечивается высокая мощность гидравлического цилиндра, он обладает демпфирующими свойствами, конструктивно прост, что положительно отражается на его первоначальной стоимости.

Использование электроцилиндров без соответствующих технических характеристик, установленных в едином нормативном документе, может привести к негативным последствиям. При этом современные достижения в области быстродействующей электроники и снижение ее стоимости позволяют решить данную проблему. Однако для оптимизации проектирования и выбора рабочих параметров электроцилиндров необходим единый нормативный документ, который позволит минимизировать финансовые и временные затраты, а также повысить уровень безопасности ПТО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев В. К.* Перспективы перехода эксплуатации от дизельных ричстакеров к электрическим ричстакерам / В. К. Васильев // Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: традиции, инновации (РИВВТ-2023): сборник трудов межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 05 декабря 2023 года. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2024. — С. 73–77. — EDN EZRFJC.
2. *Zeng Y.* Analysis of Carbon Emission Reduction at the Port of Integrated Logistics: The Port of Shanghai Case Study / Y. Zeng, X. Yuan, B. Hou // Sustainability. — 2023. — Vol. 15. — Is. 14. DOI: 10.3390/su151410914.
3. *Карамгужинова А. Е.* Анализ перспективы развития мехатронных систем на примере электро-гидроцилиндра повышенной эффективности / А. Е. Карамгужинова, В. Н. Кузнецова, В. В. Савинкин, Д. А. Коптяев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2020. — Т. 17. — № 1(71). — С. 22–31. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31. — EDN SOUIAI.
4. *Козлов А. В.* Оценка жизненного цикла силовых установок на аккумуляторной батарее, водородных топливных элементах, двигателе внутреннего сгорания для городских автобусов в условиях московского региона / А. В. Козлов, А. В. Порсин, Ю. А. Добровольский [и др.] // Журнал прикладной химии. — 2021. — Т. 94. — № 6. — С. 784–804. DOI: 10.31857/S004446182106013X. — EDN RLJNAW.
5. *Ланин А. П.* Опасное и вредное воздействие нефти и нефтепродуктов на окружающую среду / А. П. Ланин, А. Н. Новиков, А. В. Глухов, Р. Р. Садыков // Мир транспорта и технологических машин. — 2009. — № 1(24). — С. 98–106. — EDN TELAAP.
6. *Архипенко В. С.* Сравнительные характеристики электромеханических и гидравлических цилиндров / В. С. Архипенко, В. А. Жукова // Современные проблемы машиностроения: Труды XII Международной научно-технической конференции, Томск, 28 октября — 01 2019 года — Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — 2019. — С. 362–365. — EDN XPYFCH.
7. *Дунаев В. И.* Определение точек контакта резьбовых деталей планетарной роликовинтовой передачи / В. И. Дунаев, И. М. Егоров, И. А. Тулькова [и др.] // Наука и бизнес: пути развития. — 2015. — № 11(53). — С. 15–22. — EDN VJOCHB.
8. *Липчанская Ю. Г.* Электроцилиндры — альтернатива гидроприводу / Ю. Г. Липчанская // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 160-летию со дня рождения В. Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2013 года. — Белгород: шухова, 2013. — С. 1182–1187. — EDN SJHKN.

9. *Наупарац Д.* Сравнение электрических и гидроцилиндров: применение приводов движения гидромеханического оборудования на плотинах и судоходных шлюзах / Д. Наупарац // Гидротехника. — 2021. — № 3(64). — С. 11–14. — EDN YHTBJX.
10. *Несмиянов И. А.* Перспективы использования электроцилиндров в погрузчиках / И. А. Несмиянов, М. Е. Nikolaev, Е. Н. Захаров, Н. В. Карева // Сельский механизатор. — 2019. — № 7. — С. 28–29. — EDN VNXXMH.
11. *Ряховский О. А.* Планетарный ролико-винтовой механизм преобразования вращательного движения в поступательное, выполненный по «перевернутой» схеме / О. А. Ряховский, А. Н. Воробьев, А. С. Марохин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2013. — № 9. — С. 44–48. — EDN RCDDXL.
12. *Ивлев В. И.* Сравнительные технико-экономические характеристики пневматических и электрических приводов / В. И. Ивлев // Гидравлика. — 2023. — № 20. — С. 21–35. — EDN QKAKQS.
13. *Измайлова А. Ю.* Электромеханическая альтернатива гидравлическому и пневматическому приводу / А. Ю. Измайлова, А. Ф. Жук, В. А. Жук // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2009. — № 3. — С. 9–13. — EDN KDNDLJ.
14. *Зуб И. В.* Современные требования к правилам технической эксплуатации портового перегрузочного оборудования / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. А. Сидоренко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1152–1161. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161. — EDN YYEIHUH.
15. *Крупнов П. А.* Исследование применения альтернативных двигателей для портовой перегрузочной техники / П. А. Крупнов, И. О. Огнев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 114–117. — EDN OKBRRV.
16. *Петрова М. В.* Модернизация системы автоматического управления электроцилиндрами / М. В. Петрова, И. А. Васильев // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 57-й научно-технической конференции, Ульяновск, 23–28 января 2023 года. Том Часть 1. — Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2023. — С. 157–159. — EDN LHBGGW.
17. *Гашо Е.* Приоритеты энергоперехода на транспорте: электротяга или повышение экологического класса углеводородного топлива? / Е. Гашо, С. Белобородов, А. Ненашев // Энергетическая политика. — 2024. — № 1(192). — С. 58–69. DOI: 10.46920/2409-5516_2024_1192_58. — EDN HIVEBJ.
18. *Гаджиалиева И. В.* Применение современных электроцилиндров в управлении оборудованием гидроэнергетики / И. В. Гаджиалиева, А. М. Любичкий, М. В. Любичкий [и др.] // Sciences of Europe. — 2021. — № 69–1(69). — С. 61–64. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-69-1-61-64. — EDN YVSVHF.
19. *Гладышев Г.* Замена гидравлики на электромеханику: зачем и как это делают. Часть 1 / Г. Гладышев // Control Engineering Россия. — 2021. — № 4(94). — С. 40–44. — EDN FBTTIM.
20. *Гладышев Г.* Замена гидравлики на электромеханику: зачем и как это делают. Часть 2 / Г. Гладышев // Control Engineering Россия. — 2021. — № 5(95). — С. 36–40. — EDN UDHJIK.
21. *Максименко А. Н.* Определение основных выходных параметров гидрофицированных строительных и дорожных машин на этапе эксплуатации их жизненного цикла / А. Н. Максименко, Е. В. Заровчатская, С. В. Масловская // Наука и техника. — 2014. — № 5. — С. 60–66. — EDN SYNDZL.
22. *Саушев А. В.* Электроцилиндр как перспективный тип электромеханического привода основных двустворчатых ворот судоходных шлюзов России / А. В. Саушев, А. А. Темкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 628–637. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-628-637. — EDN JTZKLM.
23. *Lee S-U.* Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface / S-U. Lee, P. H. Chang // Control Engineering Practice. — 2002. — Vol. 10. — Is. 7. — Pp. 697–711. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00027-8.
24. *Mirza J.* Joint seals for hydraulic structures in severe climates / J. Mirza // Journal of Civil Engineering and Management. — 2014. — Vol. 20. — Is. 1. — Pp. 38–46. DOI: 10.3846/13923730.2013.799092.
25. *Rankka A.* Procedure of developing more energy efficient and electrified hydraulic systems for loader cranes / A. Rankka, A. . Dell'Amico // Frontiers in Mechanical Engineering. — 2024. — Vol. 10–2024. DOI: 10.3389/fmech.2024.1494642.
26. *Romero-Abad D.* The electric potential of an infinite conducting cylinder with an n-cusped hypocycloidal cross-section / D. Romero-Abad, R. Suárez-Córdova // European Journal of Physics. — 2022. — Vol. 43. — Is. 3. — Pp. 035205. DOI: 10.1088/1361-6404/ac5e7e.

27. Zhou J. Analytical and experimental research on stability of large slenderness ratio horizontal hydraulic hoist / J. Zhou, D. W. Shi, Z. L. Sun, T. Bi, X. H. Cheng, D. Chen, Y. Lu // Advances in Mechanical Engineering. — 2018. — Vol. 10. — Is. 10. — Pp. 1687814018803472. DOI: 10.1177/1687814018803472.

28. Виноградов Д. Н. Основные проблемы в гидравлических системах и их влияние на работу оборудования / Д. Н. Виноградов, Я. Д. Высоцкий, Е. Ю. Мирошник, Е. И. Малыцева // Сибирская деревня: 70 лет с начала освоения целинных и залежных земель в России: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию с начала освоения целинных и залежных земель в России, Омск, 06 июня 2024 года. — Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2024. — С. 488–491. — EDN NFBSNH.

29. Гаврюшенко Я. В. Условия эксплуатации и техническое обслуживание гидравлических систем / Я. В. Гаврюшенко // Актуальные аспекты развития воздушного транспорта (Авиатранс-2019): Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 50-летию со дня основания Ростовского филиала МГТУ ГА. В двух томах, Ростов-на-Дону, 21–23 июня 2019 года. Том 2. — Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования», 2019. — С. 687–692. — EDN HVNHZA.

30. Пахомин С. А. Электропривод рулевого механизма / С. А. Пахомин, Л. С. Пахомин, А. А. Лазарев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 4(196). — С. 53–56. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-4-53-56. — EDN ZWHBYP.

31. Щемелев В. Л. Автоматизация работы спредера при обработке крупнотоннажных контейнеров в условиях крена и дифферента судна / В. Л. Щемелев, И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 101–107. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-101-107. — EDN AYVDGS.

32. Щемелев В. Л. Алгоритм обучения спредера с возможностью стабилизации для совершенствования технологии перегрузки контейнеров в условиях крена и дифферента судна / В. Л. Щемелев, И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Транспортное дело России. — 2023. — № 4. — С. 223–227. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_223. — EDN UNHPJD.

REFERENCES

1. Vasil'ev, V. K. "Prospects for the transition from diesel-powered reachstackers to the operation of electric versions." *Razvitiye infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta: traditsii, innovatsii (RIVVT-2023): Sbornik trudov mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 05 dekabrya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2024: 73–77.
2. Zeng, Y., X. Yuan and B. Hou. "Analysis of Carbon Emission Reduction at the Port of Integrated Logistics: The Port of Shanghai Case Study." *Sustainability* 15.14 (2023). DOI: 10.3390/su151410914.
3. Karamguzhinova, A. E., V. N. Kuznetsova, V. V. Savinkin and D. A. Koptyaev. "Electrohydrocylinder of increased efficiency: prospects for the development of mechatronic systems." *The Russian Automobile And Highway Industry Journal* 17.1(71) (2020): 22–31. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31.
4. Kozlov, A. V., A. V. Porsin and Yu. A. Dobrovolskiy et al. "Life cycle assesment of powertrains based on a battery, hydrogen fuel cells, and internal combustion engine for urban buses under the conditions of moscow oblast." *Zhurnal Prikladnoi Khimii* 94.6 (2021): 784–804. DOI: 10.31857/S004446182106013X.
5. Lanin, A. P., A. N. Novikov, A. V. Glukhov and R. R. Sadykov. "Opasnoe i vrednoe vozdeystvie nefti i nefteproduktov na okruzhayuschuyu sredu." *World Of Transport And Technological Machines* 1(24) (2009): 98–106.
6. Arkhipenko, V. S. and V. A. Zhukova. "Sravnitel'nye kharakteristiki elektromekhanicheskikh i gidravlicheskikh tsilindrov." *Sovremennye problemy mashinostroeniya: Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Tomsk, 28 oktyabrya — 01 2019 goda* Tomsk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskiy universitet, 2019: 362–365.
7. Dunaev, V. I., I. M. Egorov and I. A. Tul'kova et al. "Determination of contact points of epicyclic roller drive threaded parts." *Science And Business: Ways Of Development* 11(53) (2015): 15–22.
8. Lipchanskaya, Yu. G. "Elektrotsilindry — al'ternativa gidroprivodu." *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V. G. Shukhova, posvyaschennaya 160-letiyu so dnya rozhdeniya V. G. Shukhova, Belgorod, 01–20 maya 2013 goda*. Belgorod: shukhova, 2013: 1182–1187.

9. Nauparats, D. "Comparison of electric and hydraulic cylinders-application of motion drives for hydro-mechanical equipment on dams and navigation locks." *Gidrotehnika* 3(64) (2021): 11–14.
10. Nesmiyanov, I. A., M. E. Nikolaev, E. N. Zakharov and N. V. Kareva. "Prospects for the use of electric cylinders in loaders." *Sel'skiy mehanizator* 7 (2019): 28–29.
11. Ryakhovskiy, O. A., A. N. Vorob'ev and A. S. Marokhin. "An inverted planetary roller screw mechanism for converting rotary motion into linear." *Bmstu Journal Of Mechanical Engineering* 9 (2013): 44–48.
12. Ivlev, V. I. "Comparative technical and economic characteristics of pneumatic and electric actuators." *Gidravlika* 20 (2023): 21–35.
13. Izmaylov, A. Yu., A. F. Zhuk and V. A. Zhuk. "Elektromekhanicheskaya al'ternativa gidravlicheskому i pnevmaticheskому privodu." *Agricultural Machinery And Technologies* 3 (2009): 9–13.
14. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and V. A. Sidorenko. "Modern requirements to the rules of technical operation of port handling equipment." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1152–1161. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161.
15. Krupnov, P. A. and I. O. Ognev. "Research of application of alternative engines for port transshipment equipment." *Transport Business Of Russia* 4 (2019): 114–117.
16. Petrova, M. V. and I. A. Vasil'ev. «Modernizatsiya sistemy avtomaticheskogo upravleniya elektrotsilindrami.» *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyah: sbornik materialov 57-iy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Ul'yanovsk, 23–28 yanvarya 2023 goda. Tom Chast' 1.* Ul'yanovsk: Ul'yanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2023: 157–159.
17. Gasho, E., S. Beloborodov and A. Nenashev. "Priorities of energy consumption in transport: electric traction or an increase in the ecological class of hydrocarbon fuels?" *Energy Policy* 1(192) (2024): 58–69. DOI: 10.469 20/2409-5516_2024_1192_58.
18. Gadzhialieva, I. V., A. M. Lyubitskiy and M. V. Lyubitskiy et al. "Application of modern electric cylinders in the management of hydropower equipment." *Sciences Of Europe* 69–1(69) (2021): 61–64. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-69-1-61-64.
19. Gladyshev, G. "Zamena gidravliki na elektromekhaniku: zachen i kak eto delayut. Chast' 1." *Control Engineering Rossiya* 4(94) (2021): 40–44.
20. Gladyshev, G. "Zamena gidravliki na elektromekhaniku: zachen i kak eto delayut. Chast' 2." *Control Engineering Rossiya* 5(95) (2021): 36–40.
21. Maksimenko, A. N., E. V. Zarovchatskaya and S. V. Maslovskaya. "Determination of main output parameters for hydroficated construction and road-building machines at operational stage of their life cycle ." *Science And Technique* 5 (2014): 60–66.
22. Saushev, A. V. and A. A. Temkin. "Electric cylinder as a promising type of electromechanical drive of the main double-leaf gates of shipping locks in russia." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 628–637. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-628-637.
23. Lee, S-U. and P. H. Chang. "Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface." *Control Engineering Practice* 10.7 (2002): 697–711. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00027-8.
24. Mirza J. "Joint seals for hydraulic structures in severe climates." *Journal of Civil Engineering and Management* 20.1 (2014): 38–46. DOI: 10.3846/13923730.2013.799092.
25. Rankka, A. and A. Dell'Amico. "Procedure of developing more energy efficient and electrified hydraulic systems for loader cranes." *Frontiers in Mechanical Engineering* 10–2024 (2024). DOI: 10.3389/fmech.2024.1494642.
26. Romero-Abad, D. and R. Suárez-Córdova. "The electric potential of an infinite conducting cylinder with an n-cusped hypocycloidal cross-section." *European Journal of Physics* 43.3 (2022): 035205. DOI: 10.1088/1361-6404/ac5e7e.
27. Zhou, J., Y. Lu, et al. "Analytical and experimental research on stability of large slenderness ratio horizontal hydraulic hoist." *Advances in Mechanical Engineering* 10.10 (2018): 1687814018803472. DOI: 10.1177/1687814018803472.
28. Vinogradov, D. N., Ya. D. Vysotskiy, E. Yu. Miroshnik and E. I. Mal'tseva. "Main problems in hydraulic systems and their impact on equipment operation." *Sibirskaya derevnya: 70 let s nachala osvoeniya tselinnyykh i zaleznykh zemel' v Rossii: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyaschennoy 70-letiyu s nachala osvoeniya tselinnyykh i zaleznykh zemel' v Rossii, Omsk, 06 iyunya 2024 goda.* Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. P. A. Stolypina, 2024: 488–491.
29. Gavryushenko, Ya. V. "Usloviya ekspluatatsii i tekhnicheskoe obsluzhivanie gidravlicheskikh sistem." *Aktual'nye aspekty razvitiya vozдушного транспорта (Aviatrans- 2019): Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 50-letiyu so dnya osnovaniya Rostovskogo filiala MGTU GA.*

V 2-kh tomakh, Rostov-na-Donu, 21–23 iyunya 2019 goda. Tom 2. Rostov-na-Donu: Obschestvo s ogranicennoy otvetstvennost'yu «Fond nauki i obrazovaniya», 2019: 687–692.

30. Pakhomin, S. A., L. S. Pakhomin and A. A. Lazarev. “Electric drive of the steering mechanism.” *Bulletin Of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences* 4(196) (2017): 53–56. DOI: 10.172 13/0321-2653-2017-4-53-56.

31. Schemelev, V. L., I. V. Zub and Yu. E. Ezhov. “Automation of spreader operation in handling large size containers at ship's list and trim.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2023): 101–107. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-101-107.

32. Schemelev, V. L., I. V. Zub and Yu. E. Ezhov. “Spreader learning algorithm with the possibility of stabilization to improve the technology of container handling in conditions of roll and trim of the ship.” *Transport Business Of Russia* 4 (2023): 223–227. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_223.

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

Бобырь Николай Юрьевич — инженер

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: nik14845@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub, Igor V. —

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

Ezhov, Yurii E. —

PhD, 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

Bobyr' Nikolaj Yu. — engineer

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: nik14845@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03 июля 2025 г.

Received: July 03, 2025.

MODELS OF CYBERATTACKS ON THE AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM NETWORK

V. V. Volkov¹, E. O. Ol'khovik², Yu. S. Fedosenko³

¹ Scientific and Production Firm «Marinek» LLC, St. Petersburg, Russian Federation

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

³ Volga State University of Water Transport, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

The study examines cyber threats within the network of the maritime Automatic Identification System (AIS). A review of available data on identified AIS vulnerabilities has shown a lack of a well-structured formal description and classification of threats. At present, the existing scenario-based attack models do not encompass the full spectrum of possible threats, while most approaches to AIS cybersecurity — both organizational and technical — are limited to information-security measures implemented directly on board the vessel. Five independent models of external attacks on AIS are proposed, representing typical levels of cyber threats ranging from low (single-signal spoofing) to high (combined multistage attacks employing several methods). In addition to external threats, the study also considers internal threats related to unauthorized penetration into the ship's computer network followed by destructive actions. These cases are discussed separately, as they require specific methods of analysis and mitigation. New approaches and recommendations for AIS protection are proposed. Counteracting cyber threats requires a balanced combination of organizational and technical measures, conventionally divided into software-algorithmic and hardware-architectural categories. The former includes methods for improving the AIS protocol and software, such as message authentication and encryption, anomaly filtering, and intrusion detection systems. Another important direction involves the development of algorithms for detecting falsified AIS data. This requires the creation of additional monitoring systems capable of continuously analyzing incoming information for signs of anomalies, such as the absence of a previous route, illogical maneuvers, data duplication, or desynchronization with radar observations. Future AIS cybersecurity is expected to rely on more detailed regulations and guidelines issued by classification societies, as well as on enhanced software and hardware solutions implemented both on board vessels and in shore-based centers, such as Vessel Traffic Management Systems (VTMS).

Keywords: Automatic Identification System (AIS), cybersecurity, cyber threats, threat modeling, maritime safety, maritime terrorism, vessel identification, message encryption, cyber risks, spoofing.

For citation:

Volkov, Vasily 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.

УДК 656.61.052

МОДЕЛИ КИБЕРАТАК НА СЕТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В. В. Волков¹, Е. О. Ольховик², Ю. С. Федосенко³

¹ ОО «НПФ Маринэк», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

³ ГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

В исследовании рассмотрены случаи киберугроз в сети морской автоматической идентификационной системы. Обзор данных о выявленных уязвимостях автоматической идентификационной системы показал отсутствие качественно формализованного описания и классификации угроз, так как в настоящее время предлагаемые сценарные модели атак не покрывают весь их возможный спектр, а подходы к обеспечению кибербезопасности АИС (организационные и технические меры) сводятся к сценариям

информационной безопасности непосредственно на судне. Предложено пять независимых моделей внешних атак на АИС — типовые уровни киберугрозы от низкого (единичная подделка сигнала) до высокого (комбинированная многоэтапная атака с использованием нескольких методов). Помимо внешних угроз в ходе исследования рассмотрены внутренние угрозы, связанные с проникновением в компьютерную сеть судна с последующим негативным воздействием. Эти результаты вынесены на отдельное обсуждение, поскольку требуют особого подхода и проработки. Предложены новые подходы и рекомендации к защите. Отмечается, что противодействие киберугрозам для АИС требует сочетания организационных и технических мер. Условно они разделены на программно-алгоритмические и аппаратно-архитектурные. К первым относятся методы, улучшающие протокол и программное обеспечение: аутентификация и шифрование АИС-сообщений, фильтрация аномалий, системы обнаружения атак. Обращается внимание на то, что альтернативным направлением является разработка алгоритмов выявления поддельных данных АИС, предусматривающая предварительное создание дополнительных систем мониторинга, которые могут непрерывно анализировать поступающие данные признаков аномалий: отсутствие предыдущего маршрута движения, нелогичные маневры, дублирование, рассинхронизацию с радиолокацией и т. п. Дан прогноз обеспечения кибербезопасности сетей АИС, предусматривающий создание более подробных правил и руководств классификационных обществ, а также разработку дополнительного программного обеспечения и технических средств как непосредственно на судне, так и в береговых центрах (например, в системах управления движением судов).

Ключевые слова: автоматическая идентификационная система, кибербезопасность, киберугрозы, модели угроз, безопасность судоходства, морской терроризм, идентификация судов, шифрование сообщений, киберриски, спуфинг.

Для цитирования:

Волков В. В. Определение долготы места судна по глубинам на основе нейронной сети / 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-641-652. — EDN DKQYLN.

Введение (Introduction)

Автоматическая идентификационная система (АИС, англ. AIS) — критически важная навигационная технология в судоходстве, служащая для идентификации судов, их габаритов, курса и других данных, которая предназначена для предотвращения столкновений судов и повышения ситуационной осведомленности на море. Согласно требованиям Международной конвенции СОЛАС (SOLAS¹), использование АИС является обязательным для судов с валовой вместимостью более 300 рег. т. Применение АИС позволило значительно повысить безопасность через УКВ-радиоканал суда, береговые станции и спутники — суда обмениваются данными о своем местоположении (GPS-координаты), курсе, скорости, идентификаторах судов и другой информацией в реальном режиме времени. Однако изначально протокол передачи данных АИС был разработан без учета требований кибербезопасности. Так, в Стандарте² отсутствуют шифрование и аутентификация сообщений, приемники воспринимают любые данные, передаваемые на соответствующей частоте. Это означает, что злоумышленники способны подделывать АИС-трафик данных, передавая ложные данные в системы мониторинга и тем самым вводя в заблуждение экипажи судов. За последние два десятилетия исследования и инциденты показали широкий спектр кибератак на АИС: от относительно безобидных розыгрышей до опасных действий, близких к морскому терроризму.

Международная морская организация (IMO) признает проблему кибербезопасности АИС. В 2017 г. выпущена резолюция IMO MSC.428(98), обязавшая судоходные компании включить киберриски в системы управления безопасностью не позднее 2021 г. [1]. Профильные организации также издают соответствующие рекомендации. Например, Международная ассоциация маячных служб (IALA) опубликовала руководство по эксплуатации АИС [2]. Для защиты внутренних сетей судна разработаны новые технические стандарты (в частности, IEC 61162–450 и расширение IEC 61162–460), вводящие

¹ Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года. СОЛАС 74. <https://docs.cntd.ru/document/901765675>.

² ITU-R. Recommendation ITU-R M.1371-5 (02/2014). Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band.

«электронный шлюз безопасности» для сегментации сети [3, 4]. Тем не менее внедрение этих мер происходит медленно, и гражданская АИС-сеть пока остается открытой для злоумышленников.

Актуальность проблемы подтверждена множеством публикаций. В 2013 г. специалисты Trend Micro³ на конференции Hack In The Box⁴ наглядно показали, что АИС «полностью уязвима для различных атак, которые можно реализовать с помощью недорогого оборудования» [5]. Они классифицировали атаки на две категории: *1-я категория* — вмешательство через интернет-сервисы, собирающие АИС-данные; *2-я категория* — атаки на радиоэфир АИС [5]. Различные авторы описали конкретные сценарии: подделка координат судна, создание «кораблей-призраков», ложные аварийные сигналы, блокировка каналов и т. д. Так, С. А. Семёнов (2018 г.) опубликовал обзор уязвимостей АИС и указал, что без должной защиты судно может быть потеряно в результате кибератаки [6]. В 2019 г. А. Антипов детально проанализировал потенциальные угрозы от взлома АИС: фальсификацию координат, рассылку ложных навигационных предупреждений, имитацию аварийных маяков и др. [7]. Исследователи обратили внимание на «темные флоты» — группы судов, намеренно скрывающие передачу данных АИС. В результате G. Kessler с соавторами (2024 г.) разработал инструментарий для спуфинга АИС и мониторинга таких скрытых судов [8]. Академические работы фиксируют рост реальных инцидентов: в 2019–2021 гг. наблюдались случаи появления сотен фальшивых целей возле побережья (например, у о. Эльба), подделки треков военных кораблей в пропагандистских целях, взлома навигационных систем судов и др. Все эти данные свидетельствуют о том, что кибербезопасность АИС — крайне актуальная проблема международного судоходства.

Цель исследования — систематизировать и описать известные киберугрозы для систем АИС, предложить классификацию сценариев атак и оценить методы противодействия. Для достижения этой цели были поставлены следующие частные задачи:

- проанализировать опубликованные сведения об уязвимостях АИС, реальных кибератаках и предлагаемых мерах противодействия;
- разработать формальную модель (таксономию) классификации атак по источникам, целям, последствиям и другим признакам, а также описать типовые сценарии;
- сравнить предложенные сценарные модели с существующими классификациями в имеющихся публикациях и оценить полноту их охвата;
- рассмотреть подходы к обеспечению кибербезопасности АИС (организационные и технические меры), а также предложить направления дальнейших исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование проведено методами аналитического и литературного обзора — таксономического анализа. В качестве материалов использованы открытые источники: научные статьи, технические отчеты компаний, отчеты об инцидентах и отраслевые стандарты, посвященные уязвимостям АИС и смежных систем. Вначале были отобраны сведения о выявленных уязвимостях протокола АИС и известных случаях кибератак (как экспериментальных, так и реальных). Затем эти данные были систематизированы и классифицированы по следующим основным критериям: *вектор атаки* (*внешний* — через радиоэфир или *внутренний* — через бортовую сеть судна); *уровень подготовки атакующего* (ресурсы и навыки, необходимые для реализации сценария); *масштаб и цель воздействия* (локальный сбой, дезинформация, выведение из строя и т. п.), а также *возможные последствия для судоходства*. Дополнительно учитывались мотивация злоумышленника и способ реализации (прямая радиопередача ложных данных, компрометация инфраструктуры, комбинированные методы).

На основе этих критерииов была разработана *таксономия кибератак на АИС*. Все угрозы разделены на две большие группы: *внешние*, когда атакующий не проникает на судно, а воздействует

³ Глобальная корпоративная платформа кибербезопасности на базе ИИ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.trendmicro.com/ru_ru/business.html.

⁴ Hack In The Box Security Conference Hack in the box Security Conference // Hack in the Box Security Conference [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://conference.hitb.org>.

на него извне (через радиосигналы АИС или внешние сервисы), и *внутренние*, связанные с проникновением во внутреннюю сеть или оборудование судна. В рамках внешних угроз выделено пять сценарных моделей атак, описывающих типичные ситуации — от простейшей до сложной многоэтапной диверсии. Такая классификация отражает градацию по сложности и опасности. Разработанные модели являются обобщением множества описанных в литературе сценариев. Для внутренней угрозы (атаки в корабельной сети) выполнен отдельный анализ, учитывающий специфику интегрированных мостиковых систем и стандартов (NMEA 0183, NMEA2000, IEC 61162–450/460 и др.).

Для построения предложенной классификации были учтены существующие подходы, включая модель, предложенную Trend Micro (2014), где атаки делятся на две категории: воздействие через интернет-сервисы и вмешательство в радиоканал АИС. Также рассматривались другие типологии — по целям атаки (навигация, связь, сенсоры) и по стадиям развития угрозы. Это позволило обеспечить полноту охвата и систематизировать известные сценарии. Надежность источников подтверждена использованием официальных инцидентных отчетов и рецензируемых публикаций.

Результаты (Results)

На основе исследования имеющихся данных выделено пять моделей внешних атак на АИС — типовые уровни киберугрозы от низкого (единичная подделка сигнала) до высокого (комбинированная многоэтапная атака с использованием нескольких методов). Рассмотрим формализованные сценарии каждой модели.

Модель 1 (M1) — простейшая атака минимальной сложности. Злоумышленник с базовыми техническими навыками способен выполнить ограниченную по масштабу имитацию АИС-сообщений. Имея в распоряжении недорогое оборудование (программно-определенный радиопередатчик, УКВ-антенну и компьютер), он может передать в эфир ложное АИС-сообщение, которое будет принято ближайшими судами как настоящее. Например, атака M1 — это появление на экранах окружающих судов единственной фальшивой цели: несуществующего буя, «двойника» реального судна или неверных координат какого-либо судна. Радиус воздействия ограничен (несколько морских миль), и такая акция зачастую носит характер случайной или хулиганской. Тем не менее даже единичное ложное АИС-сообщение способно дезориентировать экипаж. Из-за отсутствия аутентификации приемники не отличают подделку от легитимного трафика. Подобные инциденты уже наблюдались на практике. Это подтверждает реальность даже низкоуровневых угроз. Отдельно следует отметить случаи злоупотребления АИС судовладельцами. Например, известны эпизоды, когда экипажи намеренно передавали фиктивные координаты, чтобы скрыть заход в запрещенный порт или иное нарушение. Технически это не «взлом» чужой системы, а неправомерное использование своей, однако реализуется оно теми же средствами (передача ложных данных в эфир) и попадает в общую категорию угроз типа M1.

Модель 2 (M2) — масштабная имитация целей (атака средней сложности). В этой модели предполагается более опытный нарушитель, обладающий достаточными знаниями и ресурсами для расширенной имитации обстановки. Такой атакующий способен генерировать одновременно множество разнообразных АИС-сообщений. Сценарий M2 — это создание целого «сюжета» в АИС-сети: злоумышленник транслирует несколько фальшивых судов с различными курсами и скоростями, дополняя их виртуальными навигационными опасностями (несуществующими буями, предупреждениями о шторме, дрейфующими минами и т. п.). В результате на экранах возникает правдоподобная, но полностью ложная картина, способная ввести в заблуждение операторов службы движения (VTS) и экипажи. В отличие от модели 1, данное воздействие не случайное, а целенаправленное: *нарушитель сознательно стремится дезинформировать и создать помехи*. Несмотря на то, что изначально можно предположить отсутствие злого умысла (например, энтузиаст экспериментирует «из любопытства»), последствия M2 могут быть серьезными. Ложные предупреждения о штормах вынуждают суда менять планы, что приводит к экономическим убыткам; десяток фантомных судов могут отвлечь диспетчеров и снизить эффективность контроля. Таким

образом, граница между несанкционированным экспериментом и целенаправленной атакой размывается: модель 2 представляет ощутимую угрозу для отрасли несмотря на то, что реализуется без использования сложных технологий.

Модель 3 (М3) — целенаправленная деструктивная атака (высокий уровень угрозы). Третья модель описывает намеренное нападение на судоходство с использованием АИС как инструмента. В данном случае предполагаются высокий уровень мотивации (преступный умысел нанести ущерб) и тщательная подготовка. Атакующий в сценарии М3 сочетает все ранее описанные приемы, чтобы достичь максимального эффекта. Возможная реализация: вокруг целевого судна создается множество ложных целей — десятки фальшивых судов внезапно появляются на экране, имитируя опасное сближение. Одновременно жертве рассылаются ложные предупреждения о столкновении от этих фантомных целей. Ситуация для экипажа выглядит как внезапное окружение быстро движущимися объектами. Вахтенные могут испытать стресс и совершить ошибочные действия, а система предотвращения столкновений (ARPA / ECDIS) способна самостоятельно выдать команду уклонения. В результате судно начинает маневрировать, пытаясь избежать несуществующую опасность. Подобная атака может привести к аварийному маневру (например, уходу с безопасного фарватера). Еще одним возможным вариантом сценария данной модели является *масштабная дезинформация*: злоумышленник транслирует радиоперехват АИС, чтобы скрыть реальные угрозы. Например, на экране появляются фальшивые «пиратские катера», отвлекающие охрану, или наоборот, при реальном нападении пиратов злоумышленник добавляет множество ложных целей, маскируя истинное число нападающих. Отличительной чертой данной модели является скоординированное применение различных средств с намерением спровоцировать чрезвычайную ситуацию (столкновение, посадка на мель, паника экипажа). Характер таких атак приближается к саботажу и требует от нарушителя серьезных технических навыков. Реализовать данную модель сложнее, чем модели 1 и 2, но и эффект несопоставимо опаснее. Этот сценарий можно также комбинировать с параллельными действиями. Например, для усиления эффекта можно одновременно осуществлять GPS-спуфинг (подмену сигналов навигации). В итоге модель 3 представляет собой полномасштабную кибератаку на судно или регион, потенциально способную вызвать аварии.

Модель 4 (М4) — компрометация береговой инфраструктуры АИС. Данный тип угроз направлен не на корабельные транспондеры, а на наземный сегмент АИС — береговые базовые станции и сетевые сервисы. Береговые станции АИС управляются портовыми властями и обладают расширенными функциями: они могут рассыпать служебные команды (смена каналов, отключение передатчиков), передавать от имени береговых служб навигационные оповещения и т. д. В сценарии М4 злоумышленник либо имитирует базовую станцию, передавая сигнал с привилегиями береговой, либо взламывает реальную береговую систему / сервер. В обоих случаях он получает возможность влиять на множество судов одновременно, выступая как бы от имени «официального источника». Потенциальные атаки данной модели включают рассылку ложных команд и сообщений от имени властей. Например, злоумышленник может передать в эфир команду всем судам района переключиться на другую частоту, в результате чего часть судов потеряет связь на основном канале, или разослать навигационное предупреждение о несуществующей опасности, заставив суда изменить курс. Еще более опасным приемом является отключение АИС-транспондеров на судах.

Стандарт АИС допускает дистанционное выключение передатчика (функция для портовых служб). Если атакующий воспользуется этой командой, то он может заставить выбранное судно исчезнуть из сети АИС. Жертва перестает видеть окружающие суда и сама пропадает с их экранов. Особенно критично это при заходе в порт или в узкости: судно внезапно становится «слепым и невидимым». Реальный эксперимент показал, что злоумышленник через фальшивую базовую станцию сумел полностью погасить АИС-активность судна. Кроме того, компрометация береговых интернет-сервисов АИС, таких как публичные сайты отслеживания судов по АИС, также относится к модели 4. Атакующий, не вмешиваясь в радиоэфир, но посыпая поддельные данные в базу данных сервиса, способен создать на онлайн-картах любые ложные перемещения судов, т. е. информационную атаку, которая не влияет напрямую на безопасность навигации (экипажи на мостике

не используют интернет для навигации), но способна ввести в заблуждение аналитиков, СМИ, военные и контролирующие органы. Так, в 2021 г. были подделаны публичные треки нескольких военных кораблей, в результате создана иллюзия их захода в чужие территориальные воды и эта ложная информация попала в средства массовой информации, т. е. стала официальной. Таким образом, данная модель является более технически сложной, чем три предыдущие (требует либо хакерского взлома ПО, либо инновационных способов радиопередачи с параметрами базовой станции), но ее последствия ее могут быть более масштабными, затрагивая сразу большие регионы и множество участников.

Модель 5 (M5) — комбинированная многоэтапная атака. Представляет комплексную атаку, в которой злоумышленники используют несколько каналов и методов одновременно. В реальных условиях организованные группы не ограничиваются одним приемом, а разрабатывают многоходовые операции для гарантированного достижения цели. Сценарий M5 можно описать на примере гипотетической, но основанной на реальных уязвимостях ситуации. Предположим, атакующая группа планирует захват или саботаж конкретного судна. В данном случае план действий злоумышленников может быть следующим:

1. *Проникновение во внутреннюю сеть судна.* Заблаговременно (до выхода судна в рейс) злоумышленники инфицируют бортовую систему судна вредоносным ПО либо устанавливают скрытое устройство в сеть с целью получения доступа к навигационным данным на мостике и подготовки плацдарма для атаки изнутри.

2. *Нарушение сигналов GPS.* Когда судно входит в нужный район, злоумышленники начинают глушить или подменять сигнал спутниковой навигации (GNSS). В результате у экипажа возникают проблемы с определением позиции по GPS и увеличивается зависимость от АИС и приборов.

3. *Введение ложных АИС-целей.* Параллельно злоумышленники через радиоэфир создают вокруг судна иллюзорные объекты (например, несколько быстро сближающихся «судов — призраков»), что представляет дополнительное давление на капитана и автоматику против столкновения.

4. *Дезактивация АИС-жертвы.* Используя возможности модели 4, атакующие отправляют от имени «береговой станции» команду, отключающую передатчик АИС на судне. В результате судно «не видит» чужих сигналов и само не отображается на приборах у других судов, становясь фактически невидимым в системе.

5. *Отвлекающие ложные тревоги.* Злоумышленники генерируют ложные сигналы бедствия поблизости (например, фальшивый сигнал «человек за бортом»). Это отвлекает внимание экипажа, и он вынужден реагировать на аварийную ситуацию, которой нет. Одновременно другие суда поблизости отвлекаются на помочь ложному бедствию судну.

6. *Инициирование аварии.* В кульминационный момент атакующие создают искусственную чрезвычайную ситуацию. Например, прямо по курсу судна внезапно возникает фантомное быстрое судно, направляющееся на таран. Система выдает немедленный сигнал уклонения, автопилот или напуганный рулевой в плохую видимость может резко переложить руль, в результате чего судно совершает опасный маневр — например, налетает на мель или попадает в засаду.

Этот сложный сценарий демонстрирует многогранную природу модели 5. Комбинация внутренних и внешних воздействий делает атаку крайне трудной для обнаружения. Даже если один из каналов будет выявлен, остальные все равно могут привести к успешной кибератаке. Данная ситуация является гипотетической, все ее элементы основаны на уязвимостях АИС, GPS и судовых сетей. В реальности аналогичной сложности инциденты уже происходили. Так, согласно данным баз кибератак на море (например, ADMIRAL), с 2019 по 2024 гг. были зафиксированы сотни таких инцидентов. Таким образом, модель 5 представляет собой наиболее опасный сценарий, характеризующийся высокой сложностью и требующий комплексных мер противодействия.

Помимо внешних угроз (M1–M5) в ходе исследования были рассмотрены внутренние угрозы, связанные с проникновением в компьютерную сеть судна. Результаты приведены в раздел «Обсуждение», поскольку требуют отдельного рассмотрения.

Обсуждение (Discussion)

Предложенные пять моделей внешних атак охватывают весь спектр ранее описанных сценариев, которые в имеющихся на эту тему исследованиях либо рассматривались без четкой структуры, либо были разделены на большие категории. Например, в отчете компании Trend Micro (2014 г.) все атаки классифицированы по двум направлениям: вмешательство через интернет-сервисы, собирающие данные АИС, и воздействие на радиоканал передачи. Такой подход полезен для общего понимания, но он в недостаточной степени детализирует уровни угроз. В настоящем исследовании обе эти группы раскрыты через конкретные сценарные модели: *интернет-вектор* представлен моделью 4 (взлом береговых систем и онлайн-сервисов), *радиовектор* — моделями 1–3 (от одиночных подделок до координированных атак). Кроме того, модель 5 демонстрирует возможное сочетание сценарных моделей в рамках комплексной многоэтапной атаки, между тем как внимание других авторов работ сосредоточено лишь на частных случаях. Так, например, в публикации [7] описан случай подделки координат, ложных «мин» и штормовых предупреждений. Такие примеры относятся к предложенной в данном исследовании классификации (модели 1–2).

В работе [6] отмечается возможность «потери целых судов» из-за кибератак, что соотносится с моделью 5 (комплексная атака). Таким образом, предлагаемая таксономия не противоречит известным данным, а структурирует их. Ее преимуществом является полнота охвата: модели M1–M5 покрывают диапазон от низкоуровневых до самых сложных угроз, включая промежуточные ступени, что позволяет более ясно оценивать риски. Кроме того, рассмотрена внутренняя угроза — ранее ей уделялось меньше внимания, в исследованиях [9, 11] указывается на уязвимости внутренних сетей мостика. В данном исследовании обращается внимание на то, что защита АИС должна учитывать также *внутренние атаки, когда злоумышленник уже проник на судно*.

Внутренние атаки отличаются от внешних тем, что злоумышленник минуя радиоэфир, напрямую действует на приборы или сеть судна. Современные навигационные системы интегрированы: данные АИС, радара, GPS, эхолота объединяются в ECDIS / INS и передаются по сети. Если хакер получит доступ к этой сети (например, через уязвимый спутниковый терминал, зараженную флешку или закладное устройство), то он будет способен подменять навигационные сообщения. Практически это реализуется методами «человек посередине» (MitM) или «подделка на конце» (POTs), когда между датчиком и дисплеем вставляется вредоносный узел, изменяющий данные. Экспериментально показано, что посредством утилит (BRAT и аналогичных) можно в реальном времени транслировать в сеть корабля ложные координаты как своего судна, так и чужих судов, смещать отметки на экране и т. д. При отсутствии внешней верификации экипаж будет видеть на приборах согласованно искаженную картину в течение длительного времени, не подозревая об обмане. Опасность усиливается, если одновременно атакованы две и более системы (например, АИС и GPS). В этом случае даже проверка по независимому источнику затруднена. Результаты обзора показывают, что внутренние атаки — уже не теория и подобного рода прецеденты имели место. Так, в 2014 г. был зафиксирован случай, когда преступная группа взломала офисную сеть судоходной компании и получила доступ к журналам АИС-переговоров с тем, чтобы выследить контейнер с ценным грузом. Получив информацию о маршруте, они совершили вооруженное нападение на судно. Несмотря на то, что в данном инциденте не произошло взлома оборудования корабля, он демонстрирует ценность компрометации АИС-данных для злоумышленников. В 2019 г. на танкере во внутренней сети распространился вирус-«выкуп», что привело к выводу из строя некоторых систем. Данные случаи являются подтверждением актуальности внутренних угроз. Таким образом, выполненный авторами настоящего исследования анализ согласуется с выводами зарубежных экспертов о том, что недостаточное внедрение стандарта IEC 61162–460 (защитного шлюза) оставляет судовые сети незащищенными, и до тех пор, пока ситуация не изменится, атаки типа «подмена данных на мостике» остаются возможными [9].

Противодействие киберугрозам для АИС требует сочетания организационных и технических мер. Условно их можно разделить на *программно-алгоритмические* и *аппаратно-архитектурные*. К первым относятся методы, улучшающие протокол и программное обеспечение: аутентификация

и шифрование АИС-сообщений, фильтрация аномалий, системы обнаружения атак. Исследователи предлагают внедрить в АИС криптографическую подпись сообщений, чтобы приемники проверяли источник (например, схема с идентификацией на основе открытых ключей) [11]. Пилотные реализации такого Secure АИС разрабатываются, однако их глобальное внедрение осложнено проблемами совместимости и распределения ключей. Альтернативным направлением является создание *алгоритмов выявления подделок*. Активно исследуются системы мониторинга, которые анализируют поступающие данные признаков аномалий: нелогичные маневры, дублирование MMSI, рассинхронизация с радиолокацией и т. п. Например, если координаты АИС судна существенно расходятся с данными радара, то система может выдать предупреждение. Такие решения типа IDS — Intrusion Detection System уже частично внедряются производителями оборудования. Что касается аппаратных мер, то здесь ключевое значение имеет *сегментация и защита бортовой сети*. Стандарт IEC 61162-460 рекомендует устанавливать между навигационной сетью и другими подсистемами специальный шлюз-файрвол, контролирующий трафик и доступ. Сертифицированные устройства такого типа появляются на рынке, и некоторые суда уже оснащены ими. Кроме того, важным является применение общих мер «кибергигиены»: изоляция критичных узлов, регулярное обновление ПО навигационных комплексов, обучение экипажа. Человеческий фактор служит последней *линией защиты и свидетельством того, что морякам нельзя полагаться безоговорочно на электронные данные*. Поэтому (IMO, BIMCO) выпускают руководства для судовладельцев по разработке процедур в случае инцидентов с киберугрозой, проводят тренинги и т. д.

В работе [12] выполнен обзор текущего массива работ по кибербезопасности в морской и судоходной отраслях. В частности, обращается внимание на то, что морская кибербезопасность является новой областью научных исследований с учетом актуальности и значимости этой проблемы.

В работе [13] авторами впервые рассмотрен вопрос использования АИС для морских автономных надводных судов (МАНС). Отмечается, что ретроспективные данные АИС могут быть использованы для прогнозирования траектории движения судов, что, с одной стороны, является релевантным подходом, а с другой, соответствует моделям угроз М2–М3. При этом авторы предлагают использовать инфраструктуру АИС для передачи маршрутной информации, что при соответствующей формализации протоколов обмена может обеспечить устойчивость к киберугрозам класса подмены существующего траффика движения, например, на ранее записанный, но с деформированными временными метками.

В работе [14] авторы приводят результаты масштабного анализа данных АИС в Балтийском море с целью выявления опасностей, а также изучения практических действий экипажей судов при расхождении или при наличии навигационных опасностей. Данные результаты были заложены в основу тестирования и оценки эффективности действий МАНС путем сравнения их с реальными действиями (маневрами) экипажа судов. При этом такой анализ может быть использован также при создании киберугроз, а именно создании заведомо опасной ситуации в сети АИС или создании условий для побуждения экипажа к определенным маневрам, которые в конечном итоге могут быть опасными.

Примером масштабной атаки на сеть АИС (Модель М5) могут быть данные, приведенные в работе [15], где на основе анализа трафика движения судов выделены области с максимальным транспортным потоком судов с высокой интенсивностью и плотностью движения. Скорее всего, злоумышленники будут использовать такие географические кластеры для планирования атак, поскольку высокая плотность потока судов не оставляет достаточного времени на анализ угроз и их предупреждение.

Нерешенным остается вопрос о применение методов формальной оценки безопасности IMO [16] для выявления самих угроз и их возможных последствий. Анализ имеющихся источников информации показал, что подобные исследования для АИС-сетей практически не проводятся, скорее всего, в силу сложности работы с большими объемами данных и недостаточной формализации возможных рисков. Необходимо также отдельно рассмотреть вопрос «теневого режима» АИС и «закрытых групп обмена данными». Парадоксально, но одним из способов защиты от внешних угроз

является отключение или ограничение АИС в опасных районах. Согласно требованиям международных правил капитанам судов разрешено отключать транспондер АИС, если сохранность судна находится под угрозой (например, при опасности нападения пиратов) [1, 2]. Таким образом, судно *ходит в тень*, становится невидимым для общего трафика. Широкое использование такого режима ведет к появлению закрытых групп судов, не обменивающихся данными с остальными.

В настоящее время существует феномен «темных флотов»: группы коммерческих судов (например, участвующие в нелегальных перевозках нефти) по договоренности отключают АИС, создавая параллельную невидимую сеть [8]. С одной стороны, отсутствие сигнала затрудняет для злоумышленников слежение и атаки через подделку: *«нет сигнала, нет подделки»*. С другой стороны, отказ от АИС снижает общую безопасность судоходства, так как окружающие суда не видят «погасшие» объекты. Кроме того, преступные группы могут использовать закрытые каналы обмена навигационными данными, недоступные властям. Обсуждается идея создания защищенных кластеров АИС, когда, например, военные корабли или конвой могут обмениваться координатами только внутри зашифрованной группы. По сути, это аналог *теневого режима*, но в контролируемом формате. Пока такие решения не стандартизированы, но в перспективе могут появиться. В целом тенденция такова: либо АИС-сеть станет безопаснее для всех, либо все большее количество судов будут уходить «в тень», что чревато потерей основной ценности АИС, а именно прозрачности и открытости информации о движении.

Заключение (Discussion)

АИС из важнейшего инструмента обеспечения безопасности мореплавания превратилась в потенциальный вектор кибератаки. Выполненный анализ показал, что АИС имеют фундаментальные уязвимости, позволяющие злоумышленникам фальсифицировать координаты и параметры судов, создавать несуществующие цели, рассыпать дезинформацию (ложные штормовые или аварийные сигналы) и даже выводить из строя оборудование. Эти атаки могут исходить как извне (через радиоэфир), причем порог их реализации сравнительно низок, так и изнутри (через взломанные бортовые системы), что порой представляет еще большую опасность. Реальные случаи, произошедшие в течение последних 20 лет, подтвердили нетеоретический характер угроз — от экспериментальных демонстраций исследователей (Trend Micro, UT Austin и др.) до инцидентов с сотнями «кораблей-призраков» у побережий и целенаправленных кибератак в преступных целях. Все они свидетельствуют о том, что кибербезопасность на море требует не меньшего внимания, чем традиционные меры безопасности.

Международное сообщество предпринимает шаги для решения проблемы. В частности, принятие Резолюции IMO MSC.428(98) позволило учесть киберриски в рамках системы управления безопасностью судоходства [1]. Разрабатываются новые стандарты и рекомендации (например, стандарт IEC 61162-460 [4], руководства BIMCO), выходят обновления протоколов. Тем не менее, как отмечают аналитики, инерция отрасли велика: внедрение мер происходит медленно, многие предлагаемые решения являются сложными и требуют значительных финансовых затрат для практического применения [10]. Тем не менее можно предположить, что при активизации киберугроз в судоходстве на национальном уровне возникнет необходимость доработки Руководств [17] и Правил РС [18].

В настоящее время гражданская АИС-сеть остается открытой, и все суда транслируют данные в эфир без защиты. Поэтому особую роль играет мониторинг и подготовка: необходимо фиксировать все необычные инциденты (создание баз данных морских кибератак типа MCAD, ADMIRAL), распространять информацию о методах злоумышленников и вырабатывать стандарты реагирования. Экипажи должны понимать, что *«видимое на экране не всегда соответствует истине»*, и отрабатывать навыки перехода на резервные средства. Производителям оборудования рекомендовано встраивать средства индикации аномалий и недостоверности данных.

Результатом данного исследования является формализация пяти типовых моделей кибератак на сеть АИС и систематизация ранее разрозненных сведений. Предложенная классификация может служить основой для оценки рисков и разработки учебных сценариев для экипажей. Кроме того,

проанализирована внутренняя угроза и отмечается необходимость защиты не только радиоканала, но и бортовых интегрированных систем. Следующим шагом планируется практическая отработка описанных сценариев на симуляторах и тестовых стендах для оценки эффективности существующих средств защиты. Также необходимо дальнейшее исследование методов аутентификации АИС-сообщений и разработка прототипов защищенных приемопередатчиков. В целом сочетание технологических решений (шифрование, шлюзы безопасности) и организационных мер (политики кибербезопасности, обучение персонала) должно обеспечить существенное снижение рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IMO. Resolution MSC.428(98). Maritime Cyber Risk Management in Safety Management Systems. 2017. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428\(98\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428(98).pdf) (дата обращения: 27.08.2025).
2. IALA. Guideline 1082 — An Overview of AIS, Ed. 2.0. Saint-Germain-en-Laye, France: IALA, June 2016. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/IALA_Guideline_1082_An_Overview_of_AIS.pdf (дата обращения: 27.08.2025).
3. IEC. International Standard IEC 61162–450:2018. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Digital interfaces — Part 450: Multiple talkers and multiple listeners — Ethernet interconnection (Lightweight Ethernet). — Geneva: IEC, 2018. — 84 p.
4. IEC. International Standard IEC 61162–460:2015. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Digital interfaces — Part 460: Multiple talkers and multiple listeners — Ethernet interconnection — Safety and Security (Security gateway). — Geneva: IEC, 2015. — 62 p.
5. *Storm D. Hack in the Box: Researchers attack ship tracking systems for fun and profit* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.computerworld.com/article/2500102/hack-in-the-box—researchers-attack-ship-tracking-systems-for-fun-and-profit.html> (дата обращения: 27.08.2025).
6. Семёнов С. А. Сетевая угроза: как защитить морские суда от кибератак? // Транспортная безопасность и технологии. — 2018. — № 2(53). — С. 86–91.
7. Антипов А. Возможные угрозы для морского судоходства, исходящие от взломанной системы AIS SecurityLab. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/analytics/497745.php> (дата обращения: 27.08.2025).
8. Kessler G. C. AIS Spoofing: A Tutorial for Researchers / G. C. Kessler, D. M. Zorri // 2024 IEEE 49th Conference on Local Computer Networks (LCN) — 2024. — С. 1–7. DOI: 10.1109/LCN60385.2024.10639747.
9. Oruc A. Perspectives on the Cybersecurity of the Integrated Navigation System / A. Oruc, G. Kavallieratos, V. Gkioulos, S. Katsikas // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — Vol. 13. — Is. 6. — P. 1087. DOI: 10.3390/jmse13061087.
10. Munro K. Ships can't be hacked. Wrong. Pen Test Partners Blog. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pentestpartners.com/security-blog/ships-cant-be-hacked-wrong/> (дата обращения: 27.08.2025).
11. Hemminghaus C. BRAT: a BRIDGE attack tool for cyber security assessments of maritime systems / C. Hemminghaus, J. Bauer, E. Padilla // TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2021. — Т. 15. — № 1. — С. 35–44. DOI: 10.12716/1001.15.01.02.
12. Harish A. V. Literature review of maritime cyber security: The first decade / A. V. Harish, K. Tam, K. Jones // Maritime Technology and Research. — 2024. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 273805. DOI: 10.33175/mtr.2025.273805.
13. Смоленцев С. В. Проблемы использования сообщений автоматической идентификационной системы в задаче прогнозирования траекторий движения судов / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солововинченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 163–174. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-163-174. — EDN AYBTLM.
14. Smolentsev S. V. Algorithm for analyzing the automatic identification system data to identify typical scenarios for vessel divergence and testing the systems of autonomous shipping / S. V. Smolentsev, A. A. Butsanets, S. F. Shakhnov, A. P. Nyrkov, E. O. Ol'khovik // T-Comm. — 2024. — Vol. 18. — Is. 3. — Pp. 50–59. DOI: 10.3672/4/2072-8735-2024-18-3-50-59.
15. 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. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.051.

16. The Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. London: IMO, 2018 — 71 p.

17. Руководство по обеспечению кибербезопасности. НД № 2-030101-040. — Санкт-Петербург: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2021. — 46 с.

18. Правила классификации и постройки морских судов, часть XXI: Киберустойчивость. НД № 2-020101-174. — Санкт-Петербург: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2025. — 74 с.

REFERENCES

1. IMO. Resolution MSC.428(98). Maritime Cyber Risk Management in Safety Management Systems. 2017. Web. 27 Aug. 2025 <[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428\(98\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428(98).pdf)>.
2. IALA. Guideline 1082 — An Overview of AIC, Ed. 2.0. Saint-Germain-en-Laye, France: IALA, June 2016. Web. 27 Aug. 2025 <https://navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/IALA_Guideline_1082_An_Overview_of_AIC.pdf>.
3. IEC. *International Standard IEC 61162-450:2018. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Digital interfaces — Part 450: Multiple talkers and multiple listeners — Ethernet interconnection (Lightweight Ethernet)*. Geneva: IEC, 2018.
4. IEC. *International Standard IEC 61162-460:2015. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Digital interfaces — Part 460: Multiple talkers and multiple listeners — Ethernet interconnection — Safety and Security (Security gateway)*. Geneva: IEC, 2015.
5. Storm D. Hack in the Box: Researchers attack ship tracking systems for fun and profit Web. 27 Aug. 2025 <<https://www.computerworld.com/article/2500102/hack-in-the-box—researchers-attack-ship-tracking-systems-for-fun-and-profit.html>>.
6. Semyonov, S.A. “Setevaya ugroza: kak zashchitit’ morskie suda ot kiberatak? “ *Transportnaya bezopasnost’ i tekhnologii* 2(53). (2018): 86–91.
7. Antipov A. Vozmozhnye ugrozy dlya morskogo sudohodstva, iskhodyashchie ot vzlomannoj sistemy AIS. SecurityLab. Web. 27 Aug. 2025 <<https://www.securitylab.ru/analytics/497745.php>>.
8. Kessler, G. C. and D. M. Zorri. “AIS Spoofing: A Tutorial for Researchers.” *2024 IEEE 49th Conference on Local Computer Networks (LCN)* — 2024: 1–7. DOI: 10.1109/LCN60385.2024.10639747.
9. Oruc, A., G. Kavallieratos, V. Gkioulos and S. Katsikas. “Perspectives on the Cybersecurity of the Integrated Navigation System.” *Journal of Marine Science and Engineering* 13.6 (2025): 1087. DOI: 10.3390/jmse13061087.
10. Munro K. Ships can’t be hacked. Wrong. Pen Test Partners Blog. Web. 27 Aug. 2025 <<https://www.pentestpartners.com/security-blog/ships-can't-be-hacked-wrong/>>.
11. Hemminghaus, C., J. Bauer and E. Padilla. “BRAT: a BRIDGe attack tool for cyber security assessments of maritime systems.” *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 15.1 (2021): 35–44. DOI: 10.12716/1001.15.01.02.
12. Harish, A. V., K. Tam and K. Jones. “Literature review of maritime cyber security: The first decade.” *Maritime Technology and Research* 7.2 (2024): 273805. DOI: 10.33175/mtr.2025.273805.
13. Smolentsev, S. V., D. V. Isakov and M. B. Solodovnichenko. “Problems of using automatic identification system messages in the task of forecasting vessel movement trajectories.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 163–174. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-163-174.
14. Smolentsev, S. V., E. O. Ol’khovik, 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.
15. 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.
16. The Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. London: IMO, 2018.
17. Rukovodstvo po obespecheniyu kiberbezopasnosti. ND № 2-030101-040. Saint-Petersburg: FAU «Rossijskij morskoy registr sudohodstva», 2021.
18. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov, chast’ XXI «Kiberustojchivost’». ND № 2-020101-174. Saint-Petersburg: FAU «Rossijskij morskoy registr sudohodstva», 2025.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волков Василий Владимирович —
ведущий инженер-разработчик,
ООО «НПФ Маринэк»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, д. 12
e-mail: vasekama160599@yandex.ru

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

Федосенко Юрий Семенович —
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Систем информационной
безопасности, управления и телекоммуникаций»
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а
e-mail: fds1707@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volkov, Vasily V —
Lead Design Engineer, Scientific and Production
Firm “Marinek” LLC
12 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vasekama160599@yandex.ru

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

Fedosenko, Yuriy S. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor,
Head of the Department «Systems of Information
Security Systems, Control and Telecommunications»
Volga State University of Water Transport
Nesterova St., 5a, Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 01 сентября 2025 г.

Received: Sep. 1, 2025.

INTEGRATION OF SPLINE FUNCTION METHODS AND FUZZY LOGIC FOR SOLVING COMPLEX NAVIGATION PROBLEMS

I. V. Yuyukin

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

This paper explores the possibility of integrating fuzzy set theory with modified piecewise approximations into a unified framework for developing advanced navigation models. The optimal combination of fuzzy logic and spline functions makes it possible to account for uncertainty and inaccuracy in navigation measurements through the application of point interpolation principles. The theoretical basis of the study relies on the fuzzy approximation theorem, which states that any system can be synthesized using fuzzy logic. A practical example is provided, demonstrating the use of fuzzy sets in spline-based trajectory modeling to ensure timely avoidance of restricted navigation areas and to determine optimal trajectory parameters under routing uncertainty. An experiment was conducted to synthesize a complex spline trajectory of a vessel using linguistic variables within fuzzy logic theory. The feasibility of combining spline function methods and fuzzy set compositions was empirically confirmed through the approximation of a smooth trajectory, which increased the speed of soft computing by 15 %. The proposed hybrid approach can serve as a mathematical foundation for adaptive fuzzy models designed to predict the trajectories of mobile objects, contributing to the development of unmanned navigation concepts. A paradigm shift is anticipated—from traditional requirements for measurement accuracy based on probabilistic and statistical methods to the fuzzy domain of information granulation. The paper also examines the alternative applicability of fuzzy logic versus probability theory when using membership functions to address non-standard navigation problems. Furthermore, the study investigates the modeling of a watch officer's decision-making process based on fuzzy logic principles, emphasizing the influence of the human factor on navigational safety in intelligent hybrid systems. Managing uncertainty in cognitive navigation tasks is viewed as a key aspect of preventing emergencies through the application of fuzzy logic algebra.

Keywords: fuzzy set theory, point interpolation, fuzzy approximation theorem, linguistic variable, soft computing, adaptive fuzzy models, granulation of information, membership function, intelligent hybrid system, fuzzy logic algebra.

For citation:

Yuyukin, Igor 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.

УДК 656.61.052

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ СУДОВОЖДЕНИЯ

И. В. Ююкин

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

Темой работы является исследование возможности комплексирования теории нечетких множеств с модификациями кусочных аппроксимаций в одной универсальной парадигме для создания перспективных моделей навигации. При оптимальной комбинаторике нечеткой логики со сплайн-функцией допустимо учитывать неопределенность и неточность данных навигационных измерений на основе реализации принципа точечного интерполирования. Все предположения базируются на доказательстве теоремы нечеткой аппроксимации, согласно которой любая математическая система может быть синтезирована на основе нечеткой логики. Рассматривается практический аспект применения нечетких множеств в проблеме моделирования сплайнами конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания с целью выбора оптимальных параметров линии пути в условиях неопределенности маршрутизации. Выполнен

эксперимент синтезирования сложной линии сплайн-пути судна с применением лингвистических переменных теории нечеткой логики. Эмпирически подтверждена возможность комплексирования методов сплайн-функций и композиций нечетких множеств на примере приближения гладкой траектории с увеличением быстродействия «мягких вычислений» на 15 %. Апробированный гибридный подход предлагается использовать как математическое обеспечение аддитивных нечетких моделей для успешного прогнозирования траектории движения мобильного объекта с целью формирования концепции безэкипажного судоходства в масштабе реального времени. Прогнозируется смещение акцента от традиционных требований точности измерений в области вероятностно-статистических методов в нечеткую область «грануляции информации». Проанализирован вопрос альтернативной применимости нечеткой логики взамен теории вероятностей при использовании функции принадлежности для решения нестандартных задач. Выдвигается гипотеза необходимости анализа локальных свойств измерительной информации и методов ее обработки на основе принципов теории нечетких множеств. Исследован вопрос имитации принятия решения судоводителем на основе нечеткой логики для учета влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания при поддержки интеллектуальной гибридной системы. Предполагается, что управление неопределенностью при решении когнитивных проблем судовождения является важным вопросом предотвращения аварийных ситуаций вследствие применения алгебры нечеткой логики.

Ключевые слова: теория нечетких множеств, точечное интерполирование, теорема нечеткой аппроксимации, лингвистическая переменная, «мягкие вычисления», аддитивные нечеткие модели, грануляция информации, функция принадлежности, интеллектуальная гибридная система, алгебра нечеткой логики.

Для цитирования:

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. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-653-671. — EDN EGJBTH.

Введение (Introduction)

Возможностью для реализации перспективного подхода к нивелированию влияния «человеческого фактора» на аварийность флота представляется развитие современной системы поддержки принятия решений (СППР), формируемое с использованием формально-логических схем нечеткой логики, что обеспечивает практическую адекватность имитации мыслительных процессов судоводителя [1]. В аспекте вариативности феномена учета «человеческого фактора» частным примером является применение в судовождении нетрадиционной концепции «владения ситуацией», интерпретируемой как осведомленность судоводителя о том, что означает текущая навигационная информация и его способность прогнозировать развитие ситуации в некотором интервале времени и пространства [2]. В современном аспекте ситуационная осведомленность рассматривается как комбинация мер формализованной оценки риска в виде комплекса стратегий обеспечения безопасности в противодействие злоумышленным угрозам по перехвату управления судном [3]. Следовательно, в условиях неопределенности с полным основанием можно сделать вывод о наличии субъективного «человеческого фактора» и необходимости его оценки неформальными методами в программируемых задачах СППР.

Нечеткая логика фактически понимается не в полном смысле таковой. Многозначную логику можно рассматривать как приближенное к реальности описание возможности человека рассуждать и принимать рациональные решения на основе неопределенной, неполной и противоречивой информации при отсутствии точных измерений и вычислений¹. Нечеткую логику необходимо воспринимать как точную логику, позволяющую оперировать приблизительными человеческими рассуждениями с возможностью условно определять то, что, по сути, является неточным. Математически логический и теоретико-множественный аспекты признаются основными компонентами нечеткой логики, а ее отличительными чертами являются градуированные значения истинности, выраженные в лингвистических терминах. Таким образом, нечеткую логику можно интерпретировать как точную логику неточных и приблизительных рассуждений [4]. В условиях неопределенности принятия решения оказывается эффективным применение в формальной математике теории

¹ Ягер Р. Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. — 406 с.

нечетких множеств на основе использования принципов нечеткой логики. Неполнота и неточность информации могут заключаться в принципиальной невозможности полного сбора и учета рассеянной информации об анализируемом объекте или процессе, в также возможности проявления неожиданных свойств исследуемой модели, существование которых изначально не предполагалось.

Тенденция использования одного источника информации или одного метода обработки навигационной информации признается ненадежной для обеспечения безопасности судовождения². Комплексирование концепции нечетких множеств и модификации сплайн-функций в рамках одной универсальной парадигмы открывает перспективные возможности для моделирования сложных навигационных систем с наличием как неопределенности, так и необходимости гладкой интерполяции данных при возможности автоматической адаптации результатов измерений. Например, практическое применение нечеткой логики для синтезирования сплайнами плавности конфигурации траектории в целях своевременного уклонения от запретных районов плавания может позволить решить проблему выбора оптимальных параметров линии пути в условиях неопределенности маршрутизации.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Определить фактор успешности конвергенции теории нечетких множеств с методами кусочной аппроксимации.
2. Оценить возможность комплексирования методов сплайн-функций и нечеткой логики на примере решения задачи маршрутизации с моделированием плавной траектории.
3. Исследовать вопрос применимости теории вероятности и возможностей нечеткой логики для решения нестандартных задач.
4. Выявить преимущества решения задачи автономного плавания на основе использования принципов нечеткой логики при синтезировании сплайнами плавности конфигурации траектории.
5. Рассмотреть применимость реализации системы поддержки принятия решений на основе теории нечетких множеств.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Профессор Калифорнийского университета Л. А. Заде сформулировал тезис о том, что логика человеческого рассуждения основывается не на классической двузначной логике, а на логике с нечеткими значениями истинности, с нечеткими ассоциациями и нечеткими правилами. При традиционном подходе к учету «человеческого фактора» в поисках точности аналитики пытались подогнать реальный мир под математические модели, которые не оставляют места нечеткости. При этом математики стремились выявить законы, управляющие поведением как отдельных людей, так и их групп с помощью формализованных выражений, подобных используемым при анализе механистических систем. С точки зрения Л. А. Заде это являлось нерациональным усилием. Русский и советский академик и инженер-кораблестроитель А. Н. Крылов в «Лекциях о приближенных вычислениях» (М.: Гос. издание технико-теоретической литературы, 1954. — С. 7) отмечал необоснованность стремления к строгой точности решения прагматических задач следующим образом: «*В современных руководствах математического анализа преимущественное внимание обращается на вполне строгое установление основных понятий и на строгое доказательство всех полученных из них выводов. Ввиду этого зачастую весьма обстоятельно доказывается существование решения какого-либо вопроса и устанавливается теоретическая возможность получения его с любой степенью точности, и гораздо меньшее внимание уделяется практической части дела, т. е. действительному получению решения с данным, обыкновенно грубым, приближением, которое только и требуется в приложениях, но которое надо получить с возможно меньшою затратою труда и времени.*

Вклад нечеткой логики заключается в высокой способности точно определять то, что является неточным. В 1973 г. Л. А. Заде ввел в научный оборот понятие *лингвистической переменной*,

² Логиновский В. А. Комплексная обработка навигационных измерений: учеб. пособие. М: В/О Мортехин-формреклама, 1988. 37 с.

которая формализует слова и фразы естественного языка³. Под лингвистической переменной понимается такая переменная, значениями которой являются слова и словосочетания на естественном или искусственном языке. Фактически ученым были разработаны новые оригинальные приемы интерактивной лингвистики, позволяющие работать с нечеткими переменными подобно тому, как программисты работают с обычными логическими условиями. Теория вычислений со словами позволяет математически извлекать из фраз их смысл и оперировать с восприятиями посредством нечетких правил. Использование нечеткой логики в качестве языка моделирования, когда объекты исследования определены нечетко, признается естественным подходом. При этом парадоксальным является то, что во многих практических приложениях нечеткая логика применяется в качестве языка программирования для систем, которые точно определены. Объяснение заключается в том, что, как правило, точность сопряжена с затратами. В тех случаях, когда допускается неточность, снижение затрат может быть достигнуто за счет уменьшения точности, например, за счет сжатия данных, компрессии информации и обобщения. Результатом неточности является моделирование, которое точно не определено. На данном этапе реализуется язык нечеткого моделирования. Так можно обосновать ключевую идею, лежащую в основе гамбита нечеткой логики [4].

Традиционные методы, основанные на использовании исчисления предиката в смысле однозначной функции, определенной на некотором множестве, не подходят для имитации принятия решения, основанного на здравом смысле, поскольку строгое классическое суждение не предусматривает неопределенности. В логике классической теории множества пропозиция как тип содержания единицы языка в виде мысленного образа сущности языковой ситуации является истинной или ложной, и никакие градации истинности при этом не допускаются. Применение нечеткого множества является альтернативой формализации лингвистической информации для построения устойчивых математических моделей. В основе этого понятия находится представление о том, что составляющие нечеткое множество элементы могут обладать общим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к этому множеству с различной степенью точности. Нечеткое множество как неевклидов подход к теории множеств представляет собой совокупность нечетких элементов, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать, принадлежит этот элемент рассматриваемому множеству или нет. По сути, нечеткая структура обеспечивает естественный способ решения проблем, в которых источником неточности является отсутствие четко определенных критериев принадлежности к множественному классу, а не хаотичное воздействие случайных величин, традиционно формирующих закон распределения в качестве оценки вероятности проявления случайности.

Конвергенцию теории нечетких множеств и методов сплайн-функций можно объяснить на конкретном примере синтезирования плавности линии традиционной окружности. В расплывчатых условиях нечеткой логики окружность классической математики трансформируется в контур чернильного пятна с нечеткими границами. Применимость методов сплайн-функций эффективно реализуется даже в случае моделирования сложного контура, так как для синтезирования кривой любой степени сложности первоначально необходим грамотно подобранный набор контрольных узловых точек. Как известно, плоская кривая может быть представлена совокупностью точек при условии их достаточно близкого расположения друг к другу. В первом приближении определение кривой по известному расположению ряда точек представляет традиционное решение задачи интерполяции. Например, с помощью полиномиальной интерполяции можно обеспечить прохождение кривой через известные точечные координаты. Для этого требуется только определение коэффициентов полинома определенной степени. В целом реалистичность формы кривой линии, зафиксированной между заданными точками, зависит от порядка полинома и выбранных граничных условий.

С математической точки зрения можно использовать в общем случае задачу *аппроксимации*, когда значения контрольных точек заданы с условной точностью и необходимо определить оптимальную кривую, наилучшим образом описывающую изогеометрическую тенденцию неточного

³ Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Лори, 2021. 150 с.

представления данных. В вариативном контексте кривая может проходить только через некоторые из заданных точек, но может и не проходить ни через одну из них. Задача аппроксимирования эмпирических данных возникает, когда необходимо определить плавность линии на основании результатов приблизительных измерений с проведением моделируемой линии в некоторой окрестности узловых точек. Интерполирующая кривая формализует оценочные значения числовых данных в рассматриваемом диапазоне аргументации функции как для стандартной окружности, так и для контура чернильного пятна. Практическая задача построения по дискретным данным кривой сложной формы с сохранением выделенных геометрических характеристик исходных измерительных данных понимается как известная математическая проблема точечной интерполяции⁴. Без сомнения, точечное интерполирование имитирует способность синтезировать граничную форму чернильного пятна самым реалистичным образом.

Заметим, что вычисление значений функции в точках, лежащих за пределами промежутка, образованного узлами, организуется *экстраполированием* при сохранении в узком смысле наименования *интерполирование* в случае, когда точка математического интереса находится между сеточными узлами. Если по условию постановки задачи отсутствует заданное значение переменной в промежуточной точке, то для вычисления соответствующего значения функции приходится выполнять процедуру *интерполирования* исходя из предпосылки, что замена оригиналной функции построенным на основе использования принципа искусственного приближения интерполяционным полиномом влечет за собой ничтожную погрешность. В простейшем случае линейной интерполяции реализуется практическое правило «пропорциональных частей», которому математики механически следуют тогда, когда необходимо решить задачу интерполяции в простом варианте.

Прикладным значением с использованием возможностей сплайн-функций является решение задачи генерализации изображения подводного рельефа как сложной задачи судовождения [5]. В аспекте рассматриваемого вопроса особое значение приобретает проблема *синтезирования безопасной изобаты*, которая, по математической сути, имеет геометрическую схожесть с контуром чернильного пятна в соответствии с постулатами теории нечеткого множества. При этом необходимо учитывать, что ни при каких обстоятельствах безопасная изобата не должна допускать любых графических конфликтов, таких, например, как геометрическая петля или невероятный феномен пересечения изобат. Цель процесса генерализации фактически заключается в проверке согласованности геометрического решения путем выявления каскадных конфликтов из-за возможных математических ошибок. Спрямление безопасной изобаты акцентируется на локальной допустимой деформации при сохранении стратегических описательных характеристик эмпирической кривой с обеспечением процедуры сглаживания на глубокой стороне линии равных значений глубин.

Геометрические противоречия устраняются во время операции картографического обобщения. Обобщение контурных линий морской тематики реализуется на интуитивной основе опытного картографа в соответствии с масштабом и особенностями подводного рельефа при замене индивидуальных понятий собирательными, отвлечении от частностей и условных деталей для отчетливой визуализации главных черт воспроизведения изобат. В условиях современности автоматизированная обработка гидрографической информации формально доступна к практической реализации, но проверка батиметрических данных остается ручным процессом в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа, что определяет необходимость интерактивного исправления нечетких данных при непосредственном использовании «человеческого фактора». Разрешение любых картографических неопределенностей авторитетно осуществляется опытным гидрографом. Интуитивное *картографическое обобщение* соответствует общему принципу безопасного судоходства для обеспечения тенденции смещения обобщенного контура глубины в глубоководные районы.

При картографическом обобщении изобат автоматизированная система не всегда может правильно идентифицировать, какая из сторон безопасной изобаты глубже. Обработка гидрографических данных в ручном режиме сокращается в результате акцентирования внимания только на те

⁴ Гончаров В. В. Теория интерполирования и приближения функций. М-Л.: ОНТИ-ГТТИ, 1934. 316 с.

области, в которых определена значительная неопределенность промеров для выявления аномальных морфологических особенностей морского дна. При любых обстоятельствах навигационная карта должна соответствовать правилу смещения безопасной изобаты в сторону увеличения глубины для реализации гарантии того, что судно никогда не сядет на мель из-за искаженного предоставления гидрографической информации [6].

Неопределенность наличия навигационных опасностей приводит к неопределенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа. Визуальные деформации безопасной изобаты могут быть устранены путем локального смещения изолинии в сторону более глубокой воды за счет реализации математической операции сглаживания. Для улучшения эстетических характеристик процедура сглаживания выполняется путем устранения колебаний синтезированной линии при сохранении информации о форме и ориентации алгебраической кривой с помощью устранения несущественных деталей. Сглаживание выполняется путем сохранения базисных точек сплайновой кривой всегда на глубокой стороне исходной линии, чтобы финальный результат соответствовал безопасности представления гидрографической информации. Оперативное управление формой моделируемой изобаты осуществляется за счет плавности, гладкости и задания оптимального количества маркерных точек узлов аппроксимации для повышения сплайновой адаптивности и гибкости геометрической модели за счет своей вычислительной эффективности при сегментировании контурных линий высокой сложности.

Адекватное электронное представление навигационной нагрузки должно создаваться как удобочитаемая карта, максимально приближенная к морфологической реальности. В ситуациях использования опыта гидрографа логично применять нечеткую логику с целью достижения реалистичности отражения морфологического генезиса. Апробация сплайн-аппроксимации изобаты позволяет аналогичным образом формализовать расплывчатый контур чернильного пятна при создании предпосылки применения теории нечетких множеств для решения сложных задач судовождения. В аспекте использования нечеткой логики для решения прикладных задач алгоритмы дополнительно основываются на корректировке функции принадлежности, сформированной на основе экспертного заключения, выполненного на базе анализа агрегированных мнений.

Результаты (Results)

В процессе решения классических задач судовождения используется многофакторная информация о навигационной обстановке. В условиях высокого уровня автоматизации навигационных комплексов помимо показаний многочисленных приборов, штурман интуитивно дополнительно использует обзорно-сравнительные методы навигации на основе обобщения коллективного судоводительского опыта. Представляется перспективным учитывать так называемые *лоцманские методы*, по формальным принципам реализуемые на практике при плавании в сложных условиях для обеспечения высокой помехозащищенности навигационных измерений. При этом конкретная ситуация может не соответствовать прогнозируемой теоретической точности запланированной обсервации. В результате комбинирования разнородной информации у опытного судоводителя создается полная картина ретроспективной обстановки. Несмотря на то, что компьютеризированная навигационная аппаратура является надежной, персональную ответственность за принятие адаптированного решения по управлению судном несет судоводитель. При этом вахтенный помощник обязан контролировать достоверность автоматизированной информации всеми возможными способами на основе критических субъективных оценок. Возможность математической формализации навыков опытного вахтенного помощника появляется при условии применения теории нечетких множеств (ТНМ).

Наиболее перспективным направлением комплексной обработки навигационной информации представляется композиционное объединение возможностей арсенала *теории сплайн-функций с элементами нечеткой логики*. Для реализации данной идеи существуют конкретные теоретические предпосылки неформальной математики. Объединение концепций нечетких множеств и сплайн-функций

ций в судовождении может быть объективным для комплексного решения задач, связанных с неточностью исходных данных, а также с неопределенностью правил безопасного управления судном.

Основу ТНМ составляет так называемая *функция принадлежности*, которая хорошо описывает условно обозначенные границы нечетких множеств. Графическое понятие *треугольной функции* принадлежности μ отображено на рис. 1 [7]. Как показано на рисунке, универсум U является континуумом для каждого i значения некоторого нечеткого множества A для учета неточности в определении меры принадлежности. По сути, функция принадлежности определяет фактор *информационной грануляции*. Высокая степень гранулированности информации приводит к сокращению объемов обрабатываемой информации и к однозначному повышению быстродействия алгоритмов в задачах моделирования, управления, оптимизации и диагностики⁵.

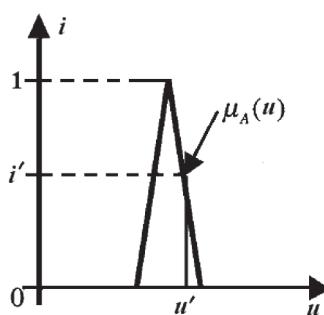


Рис. 1. Треугольная функция
меры принадлежности

Функции принадлежности могут выражать лингвистическую неопределенность, связанную с различными семантическими оттенками лингвистических переменных. В практике общения многие слова имеют неточные смысловые значения, которые даже в случае одного контекста могут иметь двусмысленную интерпретацию. Посредством нечетких множеств можно отражать величины рисков, имеющих место в процессе принятия решений судоводителем в критических навигационных операциях, для решения задачи многокритериальной оптимизации при наличии нечеткой информации.

Большинство человеческих знаний и связей с внешним миром включает такие построения, которые нельзя считать множествами в классическом смысле. Их следует считать нечеткими множествами с учетом степени принадлежности, т. е. *классами с нечеткими границами*, когда переход от функции принадлежности μ некоторого элемента x к определенному нечеткому множеству A (см. рис. 1) происходит не резко, а постепенно. Традиционные правила основаны на утверждении истинности или ложности, однако в процессах принятия решений используются менее строгие нечеткие правила, когда нельзя однозначно оценить истинность или ложность события или факта. При этом характеристическая функция μ в виде меры принадлежности принимает значение «1» для каждого из элементов нечеткого множества, а значение «0» для всех остальных элементов, не входящих в нечеткие границы рассматриваемой совокупности элементов (см. рис. 1).

Границами нечеткого множества являются элементы так называемого «универсума», для которых значения функции принадлежности отличны от «0» и «1». В случае «конфликтной ситуации», при которой объект нечеткого множества придерживается противоположных стратегий при наличии множества вариантов принятия решений, формируется нечеткая модель неопределенного уровня. В классической теории множеств принадлежность элементов множеству оценивается в бинарных терминах в соответствии с однозначным условием: элемент либо принадлежит, либо не принадлежит данному множеству. ТНМ оперирует постулатом градуированной оценки отношения принадлежности элементов неопределенному множеству с описанием факта отношения при помощи функции принадлежности μ .

⁵ Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М: Лаборатория знаний, 2024. — 801 с.

Нечеткие множества — это оправданное расширение классической теории множеств, поскольку мера принадлежности может действовать так же, как индикаторная функция, отображая все элементы либо в «1», либо в «0», как в классическом варианте теории множеств.

Абсолютная ассоциативность с треугольной функцией принадлежности наблюдается у сплайна первой степени, который геометрически представляет собой ломаную линию, проходящую через i сеточные узлы точечного интерполяирования по оси абсцисс x на основе комплексирования «шапочных функций» $B_i(x_i)$, как показано на рис. 2 [8].

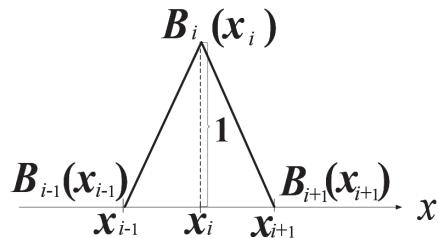


Рис. 2. Базис единичного линейного сплайна

Так как компоненты $B_{i-1}(x_{i-1})$, $B_i(x_i)$, $B_{i+1}(x_{i+1})$ финитны, то только в узле x_i отличен от нуля активный элемент B -сплайна с номером i при равенстве его функционального значения «1» (см. рис. 2). Реальная математическая кривая синтезируется путем умножения последовательности «шапочных» функций $B_i(x)$ на расчетные скалярные коэффициенты как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала. Таким образом, базисная финитная функция является вторичной по отношению к оригинальной навигационной функциональной зависимости [9]. B -сплайн является оригинальным математическим инструментарием для приближения навигационной функции и может выступить в процедуре рокировки треугольной функции принадлежности (см. рис. 1).

Геометрическая схожесть рис. 1 и 2 позволяет выдвинуть гипотезу представления сплайнов в виде нечетких множеств с утилизированием точных значений параметров сплайна. Взамен использования треугольных функций принадлежности как постулата ТНМ представляется гипотетическая возможность применения линейных B -сплайнов. При оптимальной комбинаторике нечеткой логики со сплайн-функциями становится допустимым учитывать неопределенность и неточность данных навигационных измерений на основе реализации принципа *точечного интерполяирования*.

Отдельно необходимо отметить преимущество использования подхода алгоритмизации СППР, позволяющего сформировать методики формализации сложных решений для нестандартных морских ситуаций на основе неформальной логики. Так как классические методы учета влияния на аварийность «человеческого фактора» характеризуются определенной долей субъективизма, для разработки конструктивного метода лучший эффект обеспечивает применение аппарата ТНМ с базовым атрибутом степени принадлежности μ как альтернативы плотности распределения вероятности по аксиоматике Колмогорова [10]. Теория вероятностей ориентирована на неопределенность, связанную со случайностью, а теория нечетких множеств — на неопределенность, вызванную расплывчатостью в смысле нечеткости. В теории вероятностей используются случайные величины, а в теории нечетких множеств — нечеткие множества и функция принадлежности [11]. Отсюда следует понимание различия между случайностью и нечеткостью процесса в том, что со случайностью связана *вероятностная мера*, а с нечеткостью — *мера возможности*. Адекватное понятие нечеткого события можно интерпретировать как точный смысл в контексте нечетких множеств с базовой идеей, состоящей в том, что основа для анализа информации имеет, скорее, *возможностный*, чем *вероятностный характер* [12].

Таким образом, условно можно считать, что функция принадлежности является нечетким аналогом плотности распределения вероятностей, но при этом нельзя считать меру принадлежности некоторой особенной абстракцией [13]. Плотность вероятности, характеризующая условную плот-

ность распределения случайной величины в данной точке, так же, как и функция распределения, является одной из форм закона распределения, но в отличие от функции распределения, плотность распределения вероятностей существует только для непрерывных случайных величин.

Теорию вероятностей можно рассматривать как формализацию восприятия возможности, в то время как теория вероятностей изначально основана на законе больших чисел для анализа элементарных событий. Именно массовость случайных явлений обеспечивает выполнение закономерности, при ограниченном числе случайных событий начинают сказываться так называемые *флуктуации* как неожиданное отклонение от закономерности⁶. Проявляющиеся в массе случайных событий закономерности оказываются практически независимыми от индивидуальных особенностей отдельных случайных явлений. Отдельные особенности в массе случайных событий нивелируются и фактически оказываются уже неслучайными явлениями. Методы теории вероятностей по своей природе приспособлены только для исследования массовых случайных явлений, но они не дают возможности предсказать конкретный исход отдельного элементарного события.

В значительной степени теория нечетких множеств в аспекте возможностей и теория вероятностей, скорее, дополняют друг друга, чем конкурируют [4]. Теория вероятностей имеет непосредственное отношение к семантике естественных языков, анализу решений и вычислениям с неточными вероятностями, поскольку большинство вероятностей в реальном мире инкорпорируют восприятие вероятности. При этом по своей конструкции нечеткая логика, имея более гибкую концептуальную структуру по функционалу обобщенности, позволяет с большей уверенностью анализировать явление с учетом присущих ему элементов случайности.

С точки зрения теории вероятности максимум гистограммы случайного распределения результатов измерений в традиционном варианте должен соответствовать среднему арифметическому, а зависимость высоты столбика гистограммы от числа измерений должна монотонно падать с ростом дисперсии, так как большие флуктуации маловероятны. Но на самом деле в практических экспериментах число наблюдающихся флуктуаций в зависимости от величины дисперсии может не монотонно увеличиваться или уменьшаться, и вообще, на фоне монотонного изменения может наблюдаться четкая периодическая картина распределения фокальных повторяющихся событий [14]. Классические термины «вероятность» и «случайность» не всегда предопределяют ответ на вопрос, как будут распределены измерительные флуктуации [15]. Поэтому в нестандартных ситуациях единственным вариантом практического решения задачи с расплывчатыми условиями остается применение ТНМ на основе оптимально выбранной функции принадлежности для дисперсионного анализа с точки зрения повторяемости случайных нечетких показателей [16].

В ситуации игнорирования использования нечеткой логики утрачивается возможность прогнозирования наблюдаемых явлений эксперимента. В «разбросе результатов» следует в этом случае искать нечеткие закономерности, так как традиционные методы статистической обработки результатов, основанные на центральных предельных теоремах, не приспособлены к анализу тонкой структуры распределения результатов сложного эксперимента. При этом не ставится под сомнение существование случайности в характере эксклюзивных процессов и подчинении их вероятностным методам. Но критерии согласия гипотез условности законов распределения нечувствительны в математической статистике к расплывчатой структуре распределений. По-видимому, странный разброс результатов связан не только со случайностью, но и с нечеткостью процесса. Поэтому популярный в теории вероятности критерий правдоподобия Пирсона не способен точно согласовать наблюдаемое статистическое несоответствие.

При оригинальной постановке вопроса решения задачи автономного плавания на основе использования принципов адаптивной нечеткой системы при условии синтезирования сплайнами плавности конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания может быть выявлен ряд стратегических преимуществ [17]. Во-первых, реалистичность оптимизированных виртуальных маршрутов: сплайны позволяют создавать более плавные переходы между различными перекладками руля, что приводит к более устойчивому управлению судном,

⁶ Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М: Наука, 1969. 576 с.

так как резкие изменения угла поворота руля могут привести к нестабильности управления судном. Во-вторых, возможность тонкой настройки: сплайны позволяют более точно настроить форму функции принадлежности, чтобы отразить особенности кинематики судна. В-третьих, адекватный учет нелинейностей: сплайны хорошо аппроксимируют нелинейные зависимости, которые могут присутствовать в динамике судна (например, зависимость эффективности перекладки руля от скорости судна).

На скриншоте, представленном как рис. 3 в локальной системе координат, имитирована сложная линия сплайн-пути судна, отличающаяся гибкостью моделирования за счет применения в паскаль-программе лингвистических переменных аппарата нечеткой логики с заменой треугольной функции μ (см. рис. 1) линейным базовым сплайном (см. рис. 2) в качестве меры принадлежности.

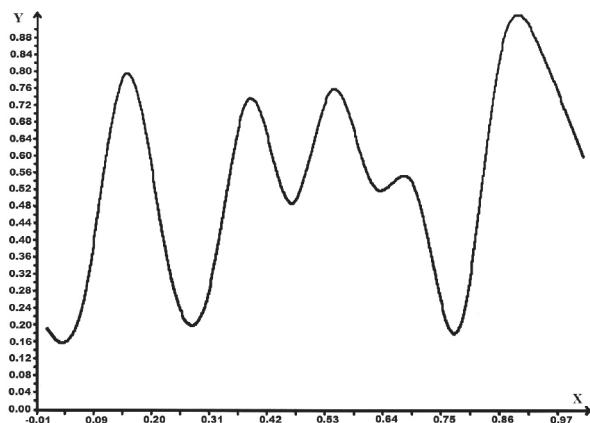


Рис. 3. Геометрическая интерпретация комплексного синтезирования траектории кубическим базисным сплайном с использованием нечеткой логики

Демонстрируемый на рис. 3 скриншот является одним из вариантов многочисленных аппликаций синтеза плавных траекторий судна по апробированным формулам B -сплайновой интерполяции навигационных изолиний [9]. Анализ данного рисунка позволяет понять, что процедура оптимизации моделирования траектории стратегически ориентирована на характеристические точки, которые определяют аппроксимирующий ее сплайн. Модернизированный сплайн-путь оперативным образом перестраивается с использованием лингвистических переменных теории нечетких множеств без формального увеличения количества сеточных точек сплайна во избежание столкновений с навигационными препятствиями. Предварительный сплайн может быть дополнительно улучшен на локальном уровне при задании в расчетной программе дополнительных лингвистических переменных для обеспечения возможности варьирования контура траектории (см. рис. 3).

В рамках комбинированного алгоритма аппроксимации разработана процедура применения логических условий на основе лингвистических переменных с синхронной реализацией в виде дополнительной подпрограммы прикладного программного обеспечения. Согласно проведенному вычислительному эксперименту скорость вычислений увеличивается на 15 % по сравнению с применением апробированной B -сплайновой аппроксимации конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания [17]. При реализации гибридного подхода время работы подпрограммы замерялось в тысячных долях секунды с зацикливанием на 100 000 при синтезировании одинаковых траекторий, одна из которых вариативно показана на рис. 3. Результаты быстродействия в цифровой реализации выводились на дисплей компьютера в паскалевской оперативной среде. При оценке успешности эксперимента уместно привести замечание основателя нечеткой логики Л. А. Заде о том, что почти всегда можно сделать такой же продукт без нечеткой логики, но с использованием нечеткой, однозначно, это будет быстрее [18]. Нечеткая логика позволяет сократить объем производимых вычислений, что, в свою очередь, приводит к увеличению

быстродействия функционирования нечетких систем⁷. На основе изучения скриншота можно сделать вывод о том, что является практически реализуемой алгоритмическая возможность аппроксимации сложной траектории при условии комплексного применения сплайн-функций и нечеткой логики. Аксиоматика теории нечетких множеств может быть успешно дополнена методами сплайн-функций с целью максимального использования преимуществ прогрессивной математики для решения сложных задач судовождения в реальном времени на основе расширения принципов операций моделирования нечеткими понятиями.

Ввиду сложности оперирования искаженными траекториями нестандартные изолинии традиционно исключались из процесса обработки информации, и задача маршрутизации судна решалась исключительно по тривиальным навигационным канонам без перспективной геометрической оценочной интерпретации. Предлагается пересмотреть стереотипное абстрагирование от искаженной траектории, поскольку методы сплайн-функций в комбинации с ТНМ позволяют оперировать такими сложными алгебраическими объектами, как разрывные в математическом смысле линии пути. Эффективное маневрирование автономным транспортным средством в оперативный обход навигационных препятствий имеет решающее значение для возможности обеспечения безопасности судовождения.

Компьютерная визуализация программированного движения судна на основе применения перспективных возможностей нечеткой логики обеспечивает возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии принятия правильного решения при любых обстоятельствах плавания за счет обеспечения ситуационной осведомленности [3]. Прогнозирование движения судна всегда имеет особую специфику неопределенности, что требует нечеткой формализации верbalного понятия *опасности ситуации* как оценки метрики, описывающей степень опасности движения [19], [20]. Предлагаемый алгоритм нечеткой логики может служить гармонизированной поддержкой для судоводительского состава при организации виртуального маршрута судна в сложных навигационных обстоятельствах. Апробированный подход может быть также использован как математическое обеспечение адаптивных нечетких моделей для прогнозирования траектории движения подвижного объекта с целью формирования концепции безэкипажного судоходства.

Для обеспечения безопасности мореплавания наряду с исследованиями в области вероятностно-статистических методов необходим анализ локальных свойств измерительной информации и методов ее обработки с целью нивелирования «измерительных неудач» на основе интуитивных принципов теории нечетких множеств [21]. Комплексирование методов сплайн-функций и нечеткой логики могут позволить успешно решать сложные задачи судовождения при условии мотивированного применения интеллектуальной гибридной системы. Нечетко-алгоритмический гибридный подход обуславливает необходимость применения новых моделей сложных морских автономных систем безэкипажного управления.

Целью проведенного исследования является практическая возможность ускоренной визуализации авторских синтезированных траекторий отдельным слоем векторной электронной карты для обеспечения понимания вахтенными помощниками глобальной стратегии маршрутизации судна в масштабе реального времени. При фактической реализуемости тактического обеспечения контроля движения судна по заданному маршруту не ставится под сомнение квалификация судоводителя. Тем не менее следует признать, что к явным преимуществам автоматизированных комплексов навигации необходимо отнести возможность круглосуточного стабильного функционирования с учетом фактора отсутствия субъективности принятия решения. В критической стрессовой обстановке плавания в сложных условиях штурману при возникновении нештатных ситуаций может не хватить когнитивного потенциала в вопросах правильного задания программной траектории, оперативного управления и регулирования безопасного движения судна при традиционной организации вахтенной службы.

⁷ Хижняков Ю. Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.

Обсуждение (Discussion)

Данными специальных исследований зафиксировано, что около 80 % аварийных случаев в мореплавании происходят, в значительной мере, по причине человеческой ошибки ввиду высокой когнитивной нагрузки вахтенного помощника [2]. Аварийность на морском транспорте в большей степени является результатом проявления «человеческого фактора», объединяющего объективные и субъективные моменты. Проблема оптимальной алгоритмизации СППР заключается в недостаточности знаний о естественных законах поведения индивидуума в экстремальной ситуации, в сложности количественной формализации его психологических составляющих и учета его влияния на безопасность судовождения [22]. Таким образом, переход от бивалентной логики к уникальным особенностям нечеткой логики является положительным шагом в решении задачи учета влияния «человеческого фактора» на развитие морских аварийных ситуаций. В условиях применения нечеткой логики с целью алгоритмизации принятия решения вахтенным помощником помимо количественных показателей появилась возможность учета также качественных переменных, т. е. с мировоззренческой точки зрения существует возможность подвергать количественному анализу те явления, которые раньше могли быть учтены только на качественном уровне. Снизить процент аварийности может позволить практическое применение композиции сплайн-функций и нечеткой логики при комплексном решении задач судовождения.

Профессор электротехники университета Южной Калифорнии Б. Коско в 1993 г. доказал так называемую *теорему нечеткой аппроксимации*, согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой с нечеткой логикой при абстрагировании от сложных дифференциальных и интегральных исчислений [23]. Следовательно, с помощью естественно-языковых высказываний с последующей их формализацией средствами теории нечетких множеств можно достаточно точно отразить произвольную взаимосвязь событий без использования сложного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемого в управлении и идентификации. Однако требование минимальности системы правил не позволяет судить о нечеткой аппроксимации как об инструменте, сколь угодно детально описывающем реальные процессы. В самом простом варианте нечеткая производственная система обеспечивает кусочно-линейную аппроксимацию зависимостей, которая при возрастании количества узлов аппроксимации монотонно приближается к аппроксимируемой нелинейной зависимости. При этом существующее ограничение количества точек аппроксимации в контексте количества лингвистических терминов лишает формальную систему такой возможности. Фактически задачу построения нечеткого аппроксиматора при ограничении количества узлов для приближения оригинальной функции можно сформулировать как задачу *оптимизации параметров аппроксимации* (выбор положения сеточных узлов, форм функций принадлежности параметра нечетким лингвистическим терминам, поиск конкретной реализации нечеткой логики) с точки зрения минимизации ошибки аппроксимации для заданной предметной области. Причем интегральным критерием качества построенного аппроксиматора может выступать также классический критерий наименьших квадратов отклонений в узлах обучающей выборки.

Нечеткие множества обобщают понятие *обычного множества*, лежащее в основе классической математики. Благодаря перспективному нововведению появилась возможность строгого изучения и применения на практике неопределенности, свойственной человеку при принятии различных решений. Л. А. Заде детально проанализировал возможности системы нечеткого вывода с точки зрения обеспечения приближенных рассуждений с учетом принципов логического следования семантической эквивалентности [24]. При наблюдаемом абстрагировании от всего нечеткого и нестрогого весьма ожидаемым явилось появление цифровых компьютеров, которые оказались весьма эффективными при работе не с гуманистическими, а с механистическими системами. Главной мыслью Л. А. Заде является то, что рассуждения и принятие решений основаны не только на измерениях, но и на генерации лингвистических оценок. Благодаря технологиям нечеткой логики в вычислительный процесс удается вовлечь как количественные, так и качественные характеристики на основе лингвистических переменных.

Благодаря операндам нечеткой логики удается формализовать всевозможные экспериментные модели, импликативно отражающие причинно-следственные связи между лингвистическими характеристиками. В результате наряду с количественными данными появилась возможность вовлечь в вычислительный процесс качественные категории. Принятие решений в нечеткой среде по принципу Беллмана – Заде является многокритериальным выбором наилучшей альтернативы, которая одновременно удовлетворяет нечетким целям как качественным критериям и нечетким ограничениям. Л. Заде и Р. Беллман отмечали, что источником неточности является не только случайность, но и нечеткость. Неопределенность организует саму природу принятия решений. Именно для учета неточности, связанной с нечеткостью, используются постулаты ТНМ [25]. Использование методов нечеткой логики позволяет приблизить построение когнитивной модели к человеческому восприятию.

В системах искусственного интеллекта (ИИ) нашла отражение новая точка зрения, в которой нечеткость принимается как универсальная реальность мышления судоводителя. Имитацию принятия решений в расплывчатых условиях предлагается формализовать в виде математического и программного обеспечения с применением методов нечеткой логики. Более конкретно нечеткую логику можно рассматривать как попытку реалистичной формализации различных человеческих способностей [4]: во-первых, способности общаться, рассуждать и принимать рациональные решения в условиях неточности, неопределенности, неполноты информации, противоречивой информации, частичной достоверности и частичной вероятности в условиях неполной информации; во-вторых, способности выполнять широкий спектр умственных задач без определенных измерений и вычислений. Рис. 4 отражает условное отсутствие различия между целью и ограничением в процедуре принятия решения в условиях рассеянной информации [7].

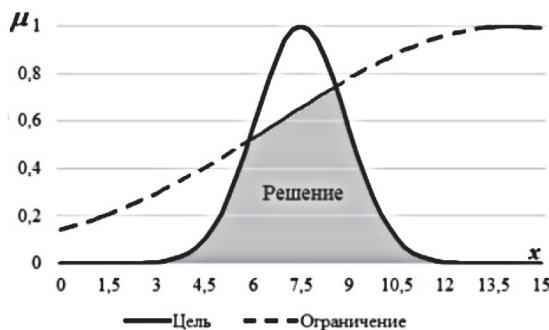


Рис. 4. Интерпретация принятия решения по нечеткому принципу Беллмана – Заде

Под принятием решений в нечеткой среде понимается процесс, в котором цели и ограничения являются нечеткими по своей природе. Процедура принятия решений с использованием современных технологий управления сопряжена с постоянно усложняющимися условиями, где одним из главных факторов неопределенности является экспоненциальный рост сложности информационной ситуации как фактор ограничения принятия решения. На рис. 4 в декартовой прямоугольной системе координат по оси абсцисс отложены абстрактные значения случайного элемента x , на оси ординат фигурирует функция принадлежности μ в ожидаемом диапазоне от 0 до 1. В связи с тем, что окружающий мир состоит не из одних нулей и единиц, нужна более гибкая логика для того, чтобы представлять его реальные взаимосвязи.

Отягощающими факторами нечеткого принципа Беллмана – Заде является возрастание сложности самой системы управления, характеризуемой распределенным характером нормального закона (см. рис. 4), и наличие многочисленных связей, включая нестационарные. Особенности математического аппарата ТНМ предполагают оптимистическую формализацию «человеческого фактора». В качестве ключевой парадигмы дальнейшего развития теории нечетких множеств следует выделить суждение Л. А. Заде о том, что парадоксальное утверждение становится возможным

для использования на практике благодаря методике внедрения нечеткости в любую систему управления, когда основной интерес состоит, скорее, в описании смысла информации, чем в определении ее меры [26].

Логические операции, реализуемые в системах ИИ, становятся более реалистичными, если они ориентируются на многозначную нечеткую логику в отличие от двузначной логики традиционной цифровой технологии, основанной на вероятностных методах аристотелевской логики. Л. А. Заде свою основополагающую работу по теории нечетких множеств опубликовал в 1965 г., а в работе по ИИ в 1973 г. предложил теорию нечеткой логики, позднее в 1994 г. — теорию так называемых «мягких вычислений» в целях ее применения в гибридных нейро-нечетких системах моделирования. Термин «мягкие вычисления» объединил нечеткую логику с технологией создания систем ИИ, основанных на приближенных методах решения когнитивных задач [27]. Осуществив заметный сдвиг научных парадигм во многих областях, эти научные работы ТНМ оказали существенное влияние на развитие как классической математики, так и способствовали развитию методов нечеткой функциональности: искусственных нейронных сетей, вероятностных рассуждений и эволюционных алгоритмов. С целью реалистичного учета влияния «человеческого фактора» гениальный математик при помощи аппарата нечеткой логики подошел достаточно близко к построению моделей приближенных рассуждений человека и использованию их в компьютерных системах на основе принципиально новой концепции: от классических вычислений с числами к «мягким вычислениям» со словами, выраженными на естественном языке или имеющими форму ментального восприятия.

Вычисления в традиционном смысле включают манипуляции с числами и символами, на-против, персоналии в основном пользуются словами при счете и рассуждениях, приходя к словесным заключениям из посылок, выраженных средствами естественного (обычного) языка или выступающих в форме сенсорно-перцептивных образов [28]. Принципиальной особенностью задач поддержки принятия решений в условиях неопределенности является необходимость учета того факта, что измерения данных выполняются на уровне «мягких измерений». Использование понятия «лингвистическая переменная» позволяет адекватно отразить приблизительное словесное описание параметров и состояний объекта или процесса в тех случаях, когда точное описание либо отсутствует, либо является слишком сложным.

Постулаты теории нечетких множеств позволяют имитировать человеческое поведение в организационных системах на основе аналитической поддержки принятия решений⁸. Теория нечетких множеств и составляющая ее базу нечеткая логика являются, фактически, шагом на пути к сближению точности классической математики и всеобщей неточности реального мира, порожденных стремлением к лучшему пониманию процессов мышления и познания. Важнейший тезис Л. А. Заде состоит в том, что в гуманистических системах, учитывающих участие человека в виде рассуждений, принятие решений основано не столько на измерениях, сколько на лингвистических переменных и перцептивных оценках. Действительно, человеческий мозг способен думать и делать заключения в неколичественных и нечетких терминах. Поэтому люди могут расшифровывать неразборчивый почерк, понимать искаженную речь, понять частично восстановленный текст, концентрировать внимание лишь на той информации, которая приводит к правильному решению. Отсутствие данной способности у цифровых вычислительных машин со стандартным программным обеспечением делает их непригодными для прямых контактов с человеком и заставляет прибегнуть к специальным, искусственно созданным языкам общения. Благодаря арсеналу средств нечеткой логики удается формализовать экспертные вербальные модели, имплицитивно отражающие причинно-следственные связи между лингвистическими характеристиками. В результате наряду с количественными данными появилась возможность вовлечь в вычислительный процесс качественные слабо структурированные категории.

⁸ Рзаев Р. Р. Аналитическая поддержка принятия решений в организационных системах. Saarbruchen: Palmerium Academic Publishing, 2016. 306 с.

Процесс принятия решений представляется как непрерывная цепь многокритериальных выборов, вырабатываемых и реализуемых в условиях воздействия многочисленных факторов различной природы. Нечеткая логика формализуется как средство эффективной поддержки процесса принятия решений путем интеграции методов обработки экспериментальной информации и аппарата нечетких множеств в качестве прогностической модели нейро-нечеткой многослойной сети. Вследствие развития данного подхода появляется оптимистическая точка зрения соответствия возможностям человека интеллектуальных программных технологий. При практической реализации гибридного подхода появляются перспективные адаптивные экспертные системы в виде производственных структур нейронных сетей с нечеткими системами логического вывода, которые объединяют в себе достоинство нейронных сетей в сфере обучаемости и нечетких систем с условной интерпретируемостью. Нечеткие нейронные сети осуществляют выводы на основе аппарата нечеткой логики, однако параметры функций принадлежности настраиваются с использованием алгоритмов обучения традиционной нейронной сети.

Представляется перспективным метод нечетких множеств, который объединяет нечеткую логику с глубоким обучением моделей ИИ. Нечеткая логика известна своей способностью управлять неопределенностью и формировать приблизительные рассуждения, обеспечивая четкую структуру, которая увеличивает возможности моделей глубокого обучения для принятия решений. Интегрируя системы, основанные на нечетких правилах, можно повысить интерпретируемость моделей глубокого обучения, сохраняя при этом их прогнозирующую эффективность. Предлагаемая стратегия объединяет логику, понятную человеку, со сложными вычислениями нейронных сетей. Эффективность комбинированного подхода подтверждается с помощью тематических исследований и экспериментов, демонстрирующих повышенную прозрачность и надежность моделей [29]. Сочетание нечеткой логики с глубоким обучением расширяет область применения ИИ в автономных системах, где безусловная объяснимость имеет решающее значение.

Управление неопределенностью в когнитивных проблемах судовождения является важным вопросом, так как судоводители в значительной степени полагаются на естественные языки для выражения мыслей и выбора сложных решений, при этом данные, на которые им приходится ориентироваться, часто являются неточными несмотря на то, что имеется доступ к большим базам данных. Для разработки новых методов анализа влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания необходимо критически пересмотреть традиционный образ мышления. Смещение акцента от традиционных требований точности измерений, которая была необходима при математическом анализе четко определенных систем и процессов, и применение ТНМ совместно с методами алгебры нечеткой логики обеспечивают решение проблемы принятия решений в условиях неопределенности.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Ассоциативность треугольной функции принадлежности с базисом линейного сплайна позволяет сформировать единый подход в рамках конвергенции ТНМ с эффективными методами кусочной интерполяции.
2. Эмпирически подтверждена возможность комплексирования методов сплайн-функций и нечеткой логики на примере синтезирования плавной траектории с увеличением быстродействия «мягких вычислений» на 15 %.
3. Проанализирован вопрос применимости нечеткой логики как альтернативы теории вероятностей при использовании условия аналогии функции принадлежности с плотностью распределения вероятности для решения нестандартных статистических задач.
4. Выявлены преимущества решения задачи программируемого плавания на основе использования принципов нечеткой логики при синтезировании сплайнами плавности конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания.

5. Имитация поддержки принятия решения судоводителем на основе теории нечетких множеств создает лучшие возможности учета влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищенко А. А. Методы поддержки принятия решений при поиске и сопровождении подвижных объектов на море: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Грищенко. — Новороссийск, 2021. — EDN STGGSY.
2. Жмур А. А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследовании случаев посадки судов на мель / А. А. Жмур, В. А. Логиновский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210. — EDN PPCSNL.
3. Ююкин И. В. Кибернетическая безопасность альтернативной автономной навигации с позиций сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364. — EDN DBSOFA.
4. Zadeh L. A. Is there a need for fuzzy logic? / L. A. Zadeh // Information Sciences. — 2008. — Vol. 178. — Is. 13. — Pp. 2751–2779. DOI: 10.1016/j.ins.2008.02.012.
5. Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934. — EDN QQIVCX.
6. Guilbert E. Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model / E. Guilbert, H. Lin // Marine Geodesy. — 2007. — Vol. 30. — Is. 1–2. — Pp. 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
7. Марданов М. Дж. Нечеткая логика Л. А. Заде как ключ к описанию гуманистических систем / М. Дж. Марданов, Р. Р. Рзаев // Problems of information society. — 2021. — Т. 12. — № 2. — С. 26–37. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02. — EDN TFTHVA.
8. Ююкин И. В. Конфигурирование комплекса сплайн-градиентов при аппроксимации навигационной изолинии линейными кусочными функционалами / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 365–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-365-383. — EDN GSETID.
9. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036. — EDN PSJYOY.
10. Алиев М. И. Теория вероятностей и теория нечетких множеств Л. Заде: различия и сходство / М. И. Алиев, Э. А. Исаева, И. М. Алиев // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2012. — № 3. — С. 19–25. — EDN PYSAWP.
11. Zadeh L. A. What Is the Relationship Between Probability Theory and Fuzzy Set Theory? / L. A. Zadeh // International Encyclopedia of Statistical Science — Springer Berlin Heidelberg, 2025. — С. 2893–2896. DOI: 10.1007/978-3-662-69359-9_749.
12. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / L. A. Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. — 1978. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 3–28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5.
13. Исаева Э. А. Сравнение теории вероятностей и теории нечетких множеств Л. Заде / Э. А. Исаева // Azerbaijan Journal of Physics Fizika C. — 2024. — С. 67–71. DOI: 10.70784/azip.3.2024C67.
14. Aliyev M. I. Random and fuzzy magnitudes as some kind of measuring devices / M. I. Aliyev, E. A. Isayeva, I. M. Aliyev // 2010 9th International conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing (ICAFS) 2010. — Prague, 2010 — С. 275–277.
15. Isayeva E. A. The role of fluctuations in artificial intelligence from Zadeh's fuzzy sets point of view / E. A. Isayeva // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51. — Is. 30. — Pp. 812–815. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.189.
16. Chen L.-H. Approaches for measurement system analysis considering randomness and fuzziness / L.-H. Chen, C.-J. Chang // International Journal of Fuzzy System Applications. — 2020. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 98–131. DOI: 10.4018/ijfsa.2020040105.

17. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.

18. Zadeh L. A. Fuzzy languages and their relation to human intelligence / L. A. Zadeh // Proceedings of the International Conference Man and Computer. — France, Bordeaux, 1972. — Pp. 130–165.

19. Гриняк В. М. Нечеткая система предупреждения об опасном сближении морских судов / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2016. — № 2. — С. 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078. — EDN VPTMJN.

20. Гриняк В. М. Оценка опасности схемы движения на акватории мерой нагрузки на судоводителей / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, А. В. Шуленина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2019. — № 12. — С. 35–40. DOI: 10.36535/0236-1914-2019-12-5. — EDN UWVMDL.

21. Логиновский В. А. Применение преобразований подобия для анализа и обработки навигационной информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Логиновский. — СПб, 1991. — 47 с.

22. Клименко В. Д. Разработка методов количественного учета влияния человеческого фактора на безопасность судна: дис. ... канд. техн. наук / В. Д. Клименко. — СПб., 2003. — 161 с.

23. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators / B. Kosko // IEEE Transactions on Computers. — 1994. — Vol. 43. — Is. 11. — Pp. 1329–1333. DOI: 10.1109/12.324566.

24. Zadeh L. A. A Theory of Approximate Reasoning (Machine Intelligence) / L. A. Zadeh. — New York: Halstead Press, 1979. — Pp. 149–194.

25. Bellman R. E. Decision-Making in a Fuzzy Environment / R. E. Bellman, L. A. Zadeh // Management Science. — 1970. — Vol. 17. — Is. 4. — Pp. B-141-B-164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141.

26. Zadeh L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes / L. A. Zadeh // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1973. — Vol. SMC-3. — Is. 1. — Pp. 28–44. DOI: 10.1109/TSMC.1973.5408575.

27. Zadeh L. A. The roles of fuzzy logic and soft computing in the conception, design and deployment of intelligent systems / L. A. Zadeh // Software Agents and Soft Computing Towards Enhancing Machine Intelligence: Concepts and Applications — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. — С. 181–190. DOI: 10.1007/3-540-62560-7_45.

28. Zadeh L. A. Computing with words: Principal concepts and ideas (Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 277) / L. A. Zadeh. — Berlin: Springer, 2012. — 156 p. DOI: 10.1007/978-3-642-27473-2.

29. Imamguluyev R. Integrating Fuzzy Logic with Deep Learning: A New Approach to Explainable Artificial Intelligence / R. Imamguluyev // 2025 6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI) — 2025. — С. 1701–1706. DOI: 10.1109/ICMCSI64620.2025.10883618.

REFERENCES

1. Grischenko, A. A. Metody podderzhki prinyatiya resheniy pri poiske i soprovozhdennii podvizhnykh ob'ektov na more. PhD diss. Novorossiysk, 2021.
2. Zhmur, A. A. and V. A. Loginovskiy. "Using a situation awareness theory in a study of grounding incident investigations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.
3. Yuyukin, I. V. "Cybernetic security of alternative offline navigation from the standpoint of spline technology." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
4. Zadeh, L. A. "Is there a need for fuzzy logic?" *Information Sciences* 178.13 (2008): 2751–2779. DOI: 10.1016/j.ins.2008.02.012.
5. Yuyukin, I. V. "Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.
6. Guilbert, E. and H. Lin. "Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model." *Marine Geodesy* 30.1–2 (2007): 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
7. Mardanov M. J. and R. R. Rzayev. "L. A. Zadeh's "Fuzzy logic" as a key to the description of humanistic systems." *Problems of information society* 12.2 (2021): 26–37. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02.

8. Yuyukin, I. V. "Configuring a complex of splines when approximating the navigational isoline with linear piecewise functionals." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 365–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-365-383.
9. Yuyukin, I. V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
10. Aliev, M. I., E. A. Isaeva and I. M. Aliev. "Probability theory and fuzzy sets theory of l. zadeh: the difference and the similarity." *Artificial Intelligence And Decision Making* 3 (2012): 19–25.
11. Zadeh, L. A. "What Is the Relationship Between Probability Theory and Fuzzy Set Theory?" *International Encyclopedia of Statistical Science* Springer Berlin Heidelberg, 2025: 2893–2896. DOI: 10.1007/978-3-662-69359-9_749.
12. Zadeh, L. A. "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility." *Fuzzy Sets and Systems* 1.1 (1978): 3–28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5.
13. Isayeva, E. A. "Comparison of theories of probability and L. Zadeh's fuzzy sets devices." *Azerbaijan Journal of Physics Fizika C*. (2024): 67–71. DOI: 10.70784/azip.3.2024C67.
14. Aliyev, M. I., E. A. Isayeva and I. M. Aliyev. "Random and fuzzy magnitudes as some kind of measuring devices." *Proceeding of ICAFS-2010 (Ninth International conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing)*. Prague, 2010: 275–277.
15. Isayeva, E. A. "The role of fluctuations in artificial intelligence from Zadeh's fuzzy sets point of view." *IFAC-PapersOnLine* 51.30 (2018): 812–815. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.189.
16. Chen, L.-H. and C.-J. Chang. "Approaches for measurement system analysis considering randomness and fuzziness." *International Journal of Fuzzy System Applications* 9.2 (2020): 98–131. DOI: 10.4018/ijfsa.2020040105.
17. Yuyukin, Igor 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.
18. Zadeh, L. A. "Fuzzy languages and their relation to human intelligence." *Proceedings of the International Conference Man and Computer*. France, Bordeaux, 1972.
19. Grinyak, V. M. and A. S. Devyatil'nyy. "Fuzzy collision avoidance system for ships ." *Journal Of Computer and Systems Sciences International* 2 (2016): 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078.
20. Grinyak, V. M., A. S. Devyatil'nyy and A. V. Shulenina. "Assessment of marine traffic safety in aquatories as a metric of impact on navigators." *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection* 12 (2019): 35–40. DOI: 10.36535/0236-1914-2019-12-5.
21. Loginovsky, Vladimir A. *Primenenie preobrazovaniy podobiya dlya analiza i obrabotki navigatsionnoy informatsii*. Abstract of Grand PhD Diss. SPb, 1991.
22. Klimenko V. D. *Razrabotka metodov kolishestvennogo usheta vliyaniya shelovesheskogo faktora na bezopasnost' sudna*. PhD diss. SPb, 2003.
23. Kosko, B. "Fuzzy systems as universal approximators." *IEEE Transactions on Computers* 43.11 (1994): 1329–1333. DOI: 10.1109/12.324566.
24. Zadeh, Lotfi A. *A Theory of Approximate Reasoning (Machine Intelligence)*. New York: Halstead Press, 1979.
25. Bellman, R. E. and L. A. Zadeh. "Decision-Making in a Fuzzy Environment." *Management Science* 17.4 (1970): B-141-B-164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141.
26. Zadeh, L. A. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-3.1* (1973): 28–44. DOI: 10.1109/TSMC.1973.5408575.
27. Zadeh, L. A. "The roles of fuzzy logic and soft computing in the conception, design and deployment of intelligent systems." *Software Agents and Soft Computing Towards Enhancing Machine Intelligence: Concepts and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997: 181–190. DOI: 10.1007/3-540-62560-7_45.
28. Zadeh, L. A. *Computing with words: Principal concepts and ideas (Studies in Fuzziness and Soft Computing)*, Vol. 277). Berlin: Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-27473-2.
29. Imamguluyev, R. "Integrating Fuzzy Logic with Deep Learning: A New Approach to Explainable Artificial Intelligence." *2025 6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI) — 2025*: 1701–1706. DOI: 10.1109/ICMCSI64620.2025.10883618.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 18 августа 2025 г.

Received: Aug. 18, 2025.

OPTIMIZATION OF THE TRUCK DISCHARGE ZONE OF AN OIL TERMINAL USING DISCRETE-EVENT SIMULATION

A. V. Galin, G. M. Khvatov

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

This paper presents an optimization study of the truck discharge zone at an oil terminal using discrete-event simulation. The latest scientific literature on the subject is analyzed. The literature review shows that most studies focus on the application of simulation modeling to optimize operations at container terminals, while other types of terminals — such as bulk and liquid cargo terminals — have received considerably less attention. However, optimization of transport and handling processes at these terminals is equally important for their efficient operation. The study proposes a model developed in Python using the SimPy library to determine the optimal number of discharge racks required for efficient processing of tank trucks. The main optimization criteria are minimizing the truck queue length and waiting time. The model accounts for parameters such as truck unloading time, intervals between arrivals, and discharge performance at the racks. Five simulation runs were conducted with varying numbers of racks using a dataset with specified initial conditions. The simulation results demonstrate that the proposed model enables effective analysis of technological and layout solutions for the truck discharge zone. The model can be used to justify the required number of technological elements of the terminal. Based on the simulation outcomes, it is possible to draw conclusions about the adequacy or insufficiency of the number of racks for a given cargo flow and to assess the need for additional handling capacity. The proposed model is simple, transparent, and effective for use in the design of oil terminals.

Keywords: discrete-event simulation, oil terminal, truck discharge zone, queue optimization, SimPy library, tanker ship, tank farm, tank trucks, discharge rack, container terminal.

For citation:

Galin, Aleksandr V. and G. M. Khvatov. "Optimization of the truck discharge zone of an oil terminal using discrete-event simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 672–681. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-672-681.

УДК 656.6

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА НЕФТЕНАЛИВНОГО ТЕРМИНАЛА МЕТОДОМ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Галин, Г. М. Хватов

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

Рассмотрена задача оптимизации работы автомобильного грузового фронта нефтеналивного терминала с использованием метода дискретно-событийного моделирования. В рамках исследования проанализирована современная научная литература на эту тему, анализ которой показал, что большая часть исследований сфокусирована на вопросах применения имитационного моделирования для оптимизации процессов на контейнерных терминалах, в то время как другие виды терминалов, такие как навалочные и наливные терминалы, не так хорошо и подробно исследованы. В этой связи отмечается, что оптимизация транспортных и перегрузочных процессов на этих терминалах также важна для их эффективной эксплуатации. В данном исследовании предложена модель, разработанная на языке Python с применением библиотеки SimPy, для определения оптимального количества сливных эстакад, необходимых для эффективной обработки автоцистерн. Основным критерием оптимальности выбрана минимизация длины очереди и времени ожидания автомобилей в ней. Модель учитывает такие параметры, как время разгрузки цистерн, интервалы между прибытием автомобилей и производительность слива на эстакадах. Проведены

пять прогонов модели с варьированием количества эстакад на примере с заданными исходными данными. Результаты моделирования показали, что модель позволяет эффективно анализировать технологические и компоновочные решения автомобильного грузового фронта. Использование данной модели позволяет обосновать потребность в числе технологических элементов терминала. На основе проведенного моделирования можно сделать выводы о достаточности или недостаточности количества эстакад для заданного грузопотока, а также оценить необходимость введения в работу дополнительных перегрузочных мощностей. Предлагаемая модель является простой и эффективной для применения при проектировании нефтепаливных терминалов.

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, нефтепаливной терминал, автомобильный грузовой фронт, оптимизация очередей, библиотека SimPy, суда-танкеры, парк резервуаров, автоцистерны, разгрузочная эстакада, контейнерный терминал.

Для цитирования:

Галин А. В. Определение долготы места судна по глубинам на основе нейронной сети / А. В. Галин, Г. М. Хватов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 672–681. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-672-681. — EDN FWXUPU.

Введение (Introduction)

Морские терминалы нефти и нефтепродуктов состоят из нескольких ключевых зон, или грузовых фронтов. К главным грузовым фронтам относятся: морской грузовой фронт (причальная стенка, занятая приемом и погрузкой судов-танкеров), парк резервуаров для временного хранения нефти и нефтепродуктов, железнодорожный и / или автомобильный грузовые фронты (ЖГФ и / или АГФ), выполняющие прием и разгрузку соответствующих транспортных средств: железнодорожных вагонов-цистерн и автоцистерн.

В данном исследовании рассмотрено применение метода дискретно-событийного моделирования для определения оптимального количества сливных эстакад на АГФ нефтепаливного терминала. Большая часть современных исследований на тему имитационного моделирования транспортных узлов касается контейнерных терминалов, в то время как навалочные и наливные терминалы рассматриваются в работах реже.

Выполнен анализ имеющейся научной литературы по теме данного исследования, а также приведено описание предлагаемой модели. На конкретном примере с заданными исходными данными представлены результаты прогона модели. Выполнен анализ полученных результатов моделирования и сформулированы основные выводы данного исследования.

Цель работы заключается в формировании метода определения потребного количества сливных постов на разгрузочной эстакаде для автотранспорта наливного терминала. Задачами исследования являются анализ литературы по теме моделирования наливных терминалов, описание моделируемой системы, формулировка, разработка и прогон модели, сбор и обработка результатов моделирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данном исследовании рассматривается терминал нефтепродуктов, на который груз поступает автомобильным транспортом (автоцистернами), сливается на специализированных сливных эстакадах, загружается в резервуары для временного хранения и убывает с терминала на судах-танкерах. Условная схема такого терминала приведена на рис. 1.

В предлагаемой модели рассматривается так называемый АГФ нефтепаливного терминала. Эта технологическая зона терминала состоит из ряда сливных эстакад, на которых осуществляется разгрузка автомобилей с цистернами. Предполагается, что на одной эстакаде может одновременно разгружаться один автомобиль. Основной целью моделирования является оптимизация количества сливных эстакад. Как и многие другие решения, определение потребного количества сливных эстакад выполняется на этапе проектирования терминала. После введения объекта в эксплуатацию количество эстакад может оказаться недостаточным или избыточным. Такая ситуация может возникать

как вследствие неправильно определенного объема грузопотока на терминал, так и из-за других причин (например, неточностей использования неверных расчетных методов).

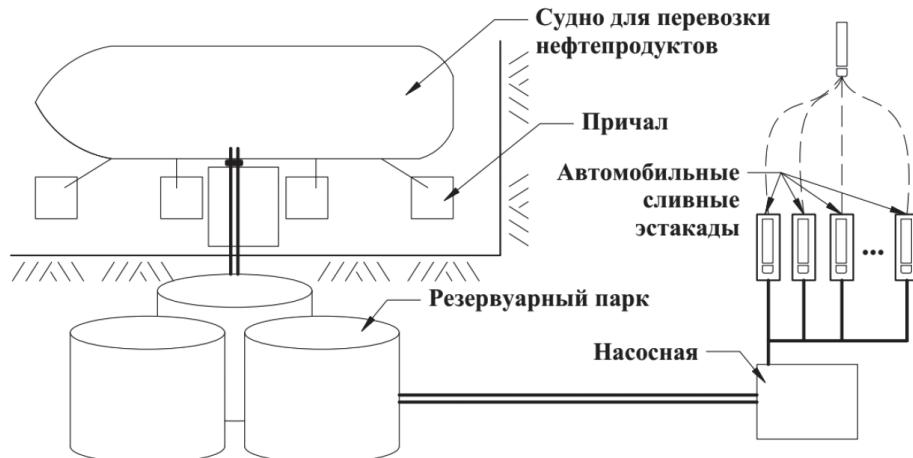


Рис. 1. Схема терминала нефтепродуктов с автомобильными сливными эстакадами

Модель, предлагаемая в настоящем исследовании, предназначена для более точного определения параметров АГФ нефтепаливного терминала. Расчетные методы, рекомендуемые в частности СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹, оперируют усредненными показателями, добавляя в расчеты некоторые коэффициенты, значения которых зачастую определяются проектировщиками на основе личного опыта. Предлагаемая модель позволяет описать систему АГФ нефтепаливного терминала не арифметическими зависимостями, а в виде системы взаимодействующих объектов и процессов. Модель основана на методе дискретно-событийного моделирования и реализует следующие основные понятия, связанные с ним:

- *дискретные события* — модель представляет собой последовательность отдельных дискретов времени, в рамках которых происходят некоторые события или выполняются процессы;
- *процессы* — элементы модели, имитирующие временные задержки, необходимые для выполнения каких-либо действий (например, слив автоцистерны на эстакаде);
- *ресурсы* — элементы модели, имитирующие объекты, используемые для выполнения процессов (например, сливные эстакады);
- *генераторы заявок* — элементы модели, создающие заявки, которые необходимо обработать для успешного выполнения некоторого процесса (например, прибытия автомобилей с цистернами).

Дискретно-событийное моделирование является подвидом имитационного моделирования. В отечественной и зарубежной научной литературе широко освещены вопросы имитационного моделирования транспортных систем. Выполним анализ исследований, связанных с этой темой, для определения нерешенных задач и выделения основных используемых методов.

В исследовании [1] рассмотрена дискретно-событийная модель контейнерного терминала, разработанная на основе электронных таблиц с использованием макросов. Данная модель позволяет имитировать основные технологические контейнерного терминала: железнодорожный грузовой фронт, морской грузовой фронт и склад. Модель представляет собой относительно простой в применении инструмент, не требующий наличия специализированного ПО для моделирования. Разработанная модель позволяет более точно оценивать пропускную способность контейнерных терминалов, учитывая взаимосвязь технологических зон.

В статье [2] рассмотрено применение имитационного моделирования для повышения точности расчета вместимости складов навалочных грузов. Имитационное моделирование позволяет

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

учесть стохастичность судозаходов, колебания грузопотока и избежать избыточных запасов технологических ресурсов. Основными факторами влияния в модели являются неравномерность прибытия судов, объемы судовых партий, годовой грузопоток и коммерческие задержки. Результаты моделирования показали, что средний запас груза на складе зависит в первую очередь от размера грузопотока и вместимости судов.

В исследовании [3] рассматривается применение имитационного моделирования для оценки сценариев развития Ванино-Совгаванского мультимодального транспортного узла (МТУ). Целью исследования является оптимизация параметров транспортной инфраструктуры для обеспечения устойчивой работы при возрастающем вагонопотоке, включая расчет мощности объектов и времени обработки заявок (поездов, судов). В качестве инструмента моделирования выбрана специализированная среда разработки AnyLogic. В модели выполнено разделение объектов МТУ на *постоянные* (станции, пути) и *переменные устройства* (погрузочная техника, бригады) с учетом случайных факторов, влияющих на время обработки заявок. В рамках оценки текущего грузопотока модель подтвердила, что МТУ справляется с 59 поездами в сутки, но при этом объекты (например, часть веток ж.-д. путей) работают на пределе с коэффициентом загрузки до 0,86. По оценкам авторов, при увеличении потока до 70 поездов в сутки система становится неэффективной: коэффициенты загрузки критически растут до 0,96 в порту Ванино, что требует модернизации инфраструктуры.

В некоторых работах, например [4, 5], предложены имитационные модели не самих транспортных и перегрузочных процессов, а процессов управления и взаимодействия заинтересованных сторон. Такие модели представляют особый интерес, поскольку находятся на стыке технических и технологических аспектов транспортных процессов, с одной стороны, и коммерческих аспектов этих процессов, с другой.

Авторы исследования [6] используют имитационное моделирование для решения проблемы простоя танкеров и возникающего в связи с этим демереджа. При этом отмечается, что длительное время ожидания танкеров на терминалах наливных грузов после отправки уведомления о готовности приводит к значительному увеличению расходов всех заинтересованных сторон. Снижение простоев является критически важным для операционной эффективности терминала. В модели учтены следующие факторы: зависимость от типа груза и размера судна, погодные условия, линейные ограничения (невозможность одновременной обработки одного типа груза на нескольких причалах).

Авторы исследования [7] описывают инфраструктурную проблему морских портов Бразилии, в частности ограниченную пропускную способность и недостаточную межмодальную интеграцию, что приводит к заторам и снижению эффективности грузовых операций. Отсутствие синхронизации прибытия грузовиков создает пиковые нагрузки и простои, увеличивая логистические издержки. Авторы предлагают модель интеграции порта с хинтерлендом («тыловой» территорией, связанной с портом наземными видами транспорта) на основе двух ключевых элементов: технологий и алгоритмического управления потоками. В качестве технологий в исследовании рассматривается использование радиочастотных меток, камер с компьютерным зрением и биометрии для ускорения обработки грузовиков на пропускных пунктах. Разработанная авторами модель основана на гибридном подходе (дискретно-событийное и микросимуляционное моделирование). Приведено обоснование того, что внедрение этой модели совместно с технологиями отслеживания перемещения грузов по терминалу позволило снизить среднюю длину очередей на 78–99 % в пяти крупных портах Бразилии. Ряд исследований [8–10] объединены темой моделирования контейнерных терминалов. Данные работы посвящены разным аспектам моделирования, начиная от оптимизации схемы планировки автоматизированных терминалов, до разработки системы поддержки операционных решений на основе имитационного моделирования.

Как видно из анализа современной литературы по теме данного исследования, в большинстве публикаций приведено описание моделей контейнерных терминалов. Таким образом, имитационное моделирование контейнерных терминалов является популярной темой исследований, поскольку перегрузка контейнеров (как и генеральных грузов) требует высокого уровня оптимизации процессов для достижения их высокой эффективности. Отсутствие оптимизированных перегрузочных

процессов на контейнерном терминале более остро влияет на снижение его доходности, чем, например, на навалочных или нефтеперерабатывающих терминалах. Однако это не означает, что потребность в оптимизации перегрузочных процессов на последних отсутствует.

Модель, предлагаемая в данном исследовании, выполнена в виде отдельного файла с кодом на языке программирования Python с использованием открытой библиотеки SimPy предназначеннной для целей имитационного и дискретно-событийного моделирования. Использование языка программирования Python и его библиотек позволяет избежать зависимости от специализированного проприетарного программного обеспечения, например, такого как AnyLogic, Arena, Simul8 и др. Компилятор языка программирования Python и многие его библиотеки, включая SimPy, распространяются бесплатно и имеют открытый исходный код, что является их существенным преимуществом. Основные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры дискретно-событийной модели

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Имя переменной в модели	Описание
Общее время разгрузки цистерны на эстакаде	t_o	мин	SERVICE_TIME	Время, затрачиваемое на слив груза на эстакаде и на вспомогательные операции с автоцистернами
Средний период прибытия автомобилей	$T_{a/m}$	мин	MEAN_ARRIVAL_TIME	Временной интервал между двумя последовательными прибытиями автомобилей на терминал
Количество сливных эстакад	$N_{a эст}$	ед.	N_POSTS	Количество сливных эстакад для автомобилей. На одной эстакаде может одновременно сливаться одна автоцистерна
Период моделирования	T	мин	SIM_PERIOD	Период моделирования в минутах. Принят 1 мес = 43290 мин

Четыре переменные, указанные в табл. 1, воспринимаются моделью как константы. Их значения должны быть напрямую введены пользователем. Для определения значений предлагается воспользоваться более удобной и наглядной формой электронных таблиц.

Обычно среднее время разгрузки автомобиля на сливной эстакаде и период времени между прибытием автомобилей не известны заранее. Они определяются на основе других исходных данных, передаваемых инвестором / заказчиком проектной организации. Среди этих исходных данных обычно указываются:

- расчетный месячный грузооборот $Q_{мес}$, тыс. м³ / мес.;
- расчетная грузовместимость одной цистерны а/м или автомобильной цистерны, V , м³;
- производительность слива на сливной эстакаде P , м³ / ч;
- время вспомогательных операций с автоцистернами на эстакаде $t_{всп}$, мин.

Если значения приведенных величин известны, то можно определить параметры модели на основе следующих формул:

$$t_o = V / P \cdot 60 + t_{всп}; \quad (1)$$

$$T_{a/m} = 60 / N_{a/m/q}; \quad (2)$$

$$N_{a/m/q} = Q_{мес} \cdot 1000 / V / 30,5 / 24. \quad (3)$$

Для моделирования неравномерности прибытия автомобилей на терминал используется экспоненциальное распределение. Для генерации значений интервалов времени прибытия используется функция `random.exponential(interval)` библиотеки NumPy, где в качестве аргумента *interval* подставлено значение параметра модели MEAN_ARRIVAL_TIME (средний интервал прибытия автоцистерн в минутах).

Результаты (Results)

Выполнено пять прогонов модели с исходными данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные, использованные в прогонах модели

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расчетный месячный грузооборот	$Q_{\text{мес}}$	тыс. м ³ / мес.	500
Расчетная грузовместимость одной цистерны а/м	V	м ³	40
Производительность слива	P	м ³ / ч	300
Время слива цистерны	$t_{\text{сл}}$	мин	8
Время вспомогательных операций	$t_{\text{всп}}$	мин	3
Общее время разгрузки цистерны	t_o	мин	11
Расчетное количество а/м в мес.	$N_{\text{а/м/мес}}$	ед. / мес	12500
Расчетное количество а/м в сут	$N_{\text{а/м/сут}}$	ед. / сут	410
Расчетное количество а/м в ч	$N_{\text{а/м/ч}}$	ед. / ч	18
Средний период прибытия а/м	$T_{\text{а/м}}$	мин	3,33

Между прогонами варьируется параметр N_{POSTS} , количество сливных эстакад — 1–5 ед. Определение оптимального значения этого параметра является основной целью моделирования.

Значения остальных параметров моделирования принимаются на основе исходных данных и расчетов по формулам (1)–(3):

- общее время разгрузки автоцистерны, $SERVICE_TIME = 11$ мин;
- средний период прибытия автоцистерн, $MEAN_ARRIVAL_TIME = 3,33$ мин;
- период моделирования, $SIM_PERIOD = 43290$ мин.

При количестве эстакад $N_{\text{а/эст}} = 1$ –3 очередь автомобилей на слив растет неограниченно. Это означает, что такого количества эстакад недостаточно для того, чтобы справиться с потоком автомобилей, прибывающих на терминал для разгрузки. Графики длины очередей для рассматриваемых трех случаев, полученные на основе моделирования, представлены на рис. 2.

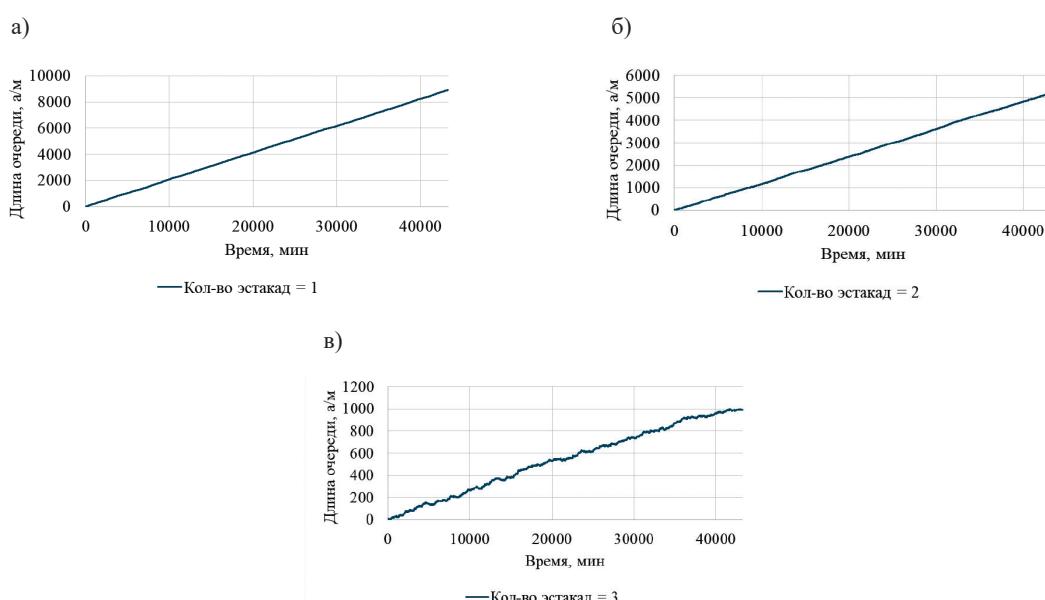


Рис. 2. Результаты моделирования длины очереди автомобилей:
а — при одной сливной эстакаде; б — при двух эстакадах; в — при трех эстакадах

Средние значения длины очереди автомобилей для этих случаев составляют:

- одна эстакада — средняя длина очереди 4458 автомобилей;
- две эстакады — средняя длина очереди 2606 автомобилей;
- три эстакады — средняя длина очереди 538 автомобилей.

При количестве эстакад $N_{\text{эст}} = 4$ или 5 очередь автомобилей на слив не демонстрирует неограниченного роста. В отличие от трех рассматриваемых вариантов при количестве эстакад, равном четырем и пяти, наблюдаются периоды увеличения и уменьшения количества автомобилей в очереди на разгрузку. Это свидетельствует о стабильности системы и ее способности справиться с заданным грузопотоком. Результаты моделирования для случаев, когда количество эстакад равно четырем и пяти, представлены на рис. 3.

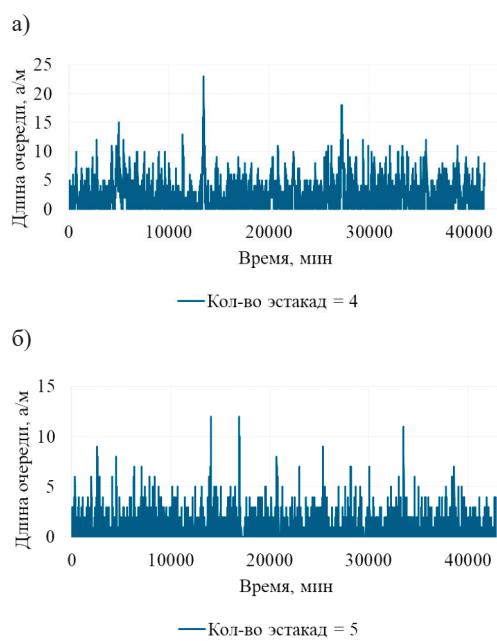


Рис. 3. Результаты моделирования длины очереди автомобилей:
 а — при четырех сливных эстакадах; б — при пяти эстакадах

Графики изменения длины очереди автомобилей на слив для всех рассмотренных вариантов приведены на рис. 4.

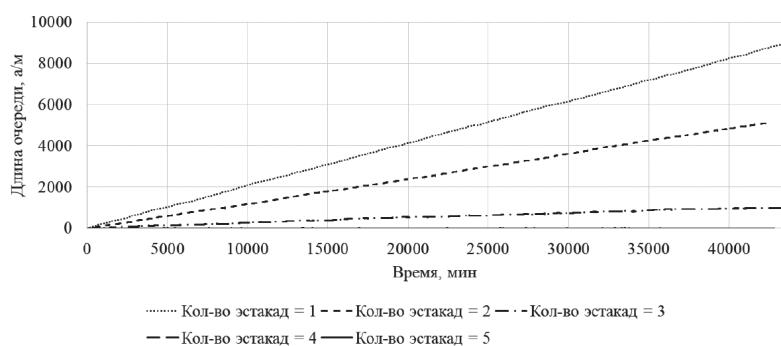


Рис. 4. Динамика изменения длины очереди в течение прогона модели

Помимо длины очереди для прогонов с четырьмя и пятью эстакадами обработаны данные по времени ожидания в очереди. Средние или Полученные средние значения этих показателей составляют:

- четыре эстакады — средняя длина очереди 2,5 автомобилей, среднее время ожидания 5,7 мин;
- пять эстакад — средняя длина очереди 0,6 автомобилей, среднее время ожидания 0,9 мин.

Гистограммы распределения времени ожидания в очереди для случаев с четырьмя и пятью эстакадами приведены на рис. 5.

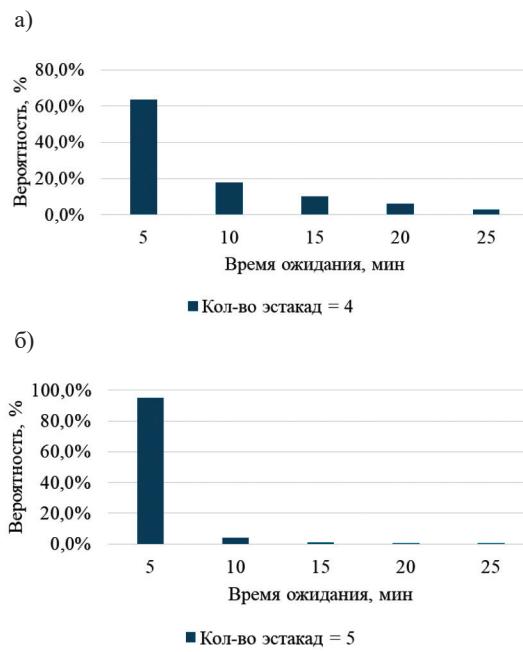


Рис. 5. Распределение времени ожидания автомобилей в очереди на слив:
а — при четырех сливных эстакадах; б — при пяти эстакадах

Сбор значений по времени ожидания в очереди выполняется для прогонов со всеми рассматриваемыми вариантами количества эстакад на терминале. Однако обработка этих значений для случаев с одной, двумя и тремя эстакадами является бессмысленной, поскольку при неограниченном увеличении длины очереди время ожидания также увеличивается неограниченно.

Обсуждение (Discussion)

Из рис. 2 видно, что с увеличением количества сливных эстакад очередь автомобилей снижается: при одной эстакаде неограниченная очередь автомобилей достигает почти 9000 автомобилей за 1 мес. моделирования, при двух эстакадах — около 5200 автомобилей за 1 месяц, при трех эстакадах — меньше 1000 автомобилей. Это особенно хорошо видно на рис. 4, где совмещены графики длины очереди автомобилей для всех рассмотренных вариантов количества эстакад. На этом рисунке графики изменения длины очередей автомобилей при количестве эстакад, равном четырем и пяти, почти совпадают с горизонтальной осью графика при масштабировании.

Средние длины очередей в случаях с одной, двумя и тремя эстакадами равны около или примерно 4500, 2600 и 540 автомобилей соответственно. Все три значения не являются реалистичными с точки зрения оперативной деятельности реально существующих (или проектируемых) терминалов. Эти показатели свидетельствуют о том, что система с таким количеством сливных эстакад для разгрузки автоцистерн принципиально не способна справиться с заданным в примере грузопотоком. Вместе с тем значения длин очередей при количестве эстакад, равном четырем и пятью, составляют 2,5 и 0,6 автомобиля в среднем соответственно, что вполне отвечает разумным ожиданиям от работы терминала. Таким образом, на основе результатов моделирования длин очередей можно сделать вывод о нецелесообразности дальнейшего рассмотрения вариантов с одной, двумя или тремя сливными эстакадами. При заданных исходных параметрах такое количество эстакад будет в любом случае недостаточным.

Варианты с количеством эстакад, равным четырем и пятью, отличаются не только средними длинами очередей, но и среднем временем ожидания автомобилей — около 6 мин и мин соответственно. Из всех приведенных результатов можно сделать вывод о необходимости и достаточности

четырех сливных эстакад для автомобилей на рассматриваемом нефтепаливном терминале. Средняя длина очереди 2,5 автомобиля и среднее время ожидания в ней около 6 мин являются приемлемыми значениями для обработки заданного грузопотока. При пяти сливных эстакадах средняя длина очереди составляет менее одного автомобиля, а среднее время ожидания в ней — менее 1 мин. Это свидетельствует о том, что на терминале почти не будет наблюдаться очередей в любой момент времени. В данном случае можно предположить, что строительство и введение в эксплуатацию пятой сливной эстакады является целесообразным для повышения качества обслуживания грузопотока, но не является обязательным для его обработки. В случае увеличения грузопотока рекомендуется провести повторное моделирование с обновленными исходными данными.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сформирован метод определения потребного количества сливных постов на разгрузочной эстакаде для автотранспорта наливного терминала. Предлагаемый метод базируется на использовании разработанной модели АГФ нефтепаливного терминала. Дискретно-событийная модель АГФ терминала нефтепродуктов разработана с использованием инструментов, находящихся в открытом доступе и с открытым исходным кодом: язык программирования Python, библиотеки SimPy и NumPy.
2. Модель является достаточно простым в применении инструментом, позволяющим быстро и эффективно оценить потребность в количестве сливных эстакад для автомобилей на нефтепаливном терминале.
3. Собранные и проанализированные данные по результатам моделирования показывают работоспособность и адекватность разработанной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602. — EDN TRJAZE.
2. Кузнецов А. Л. Расчет вместимости склада навалочных грузов морского порта с помощью имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, С. С. Валькова, А. М. Сампиев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 3. — С. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89. — EDN EKRTZA.
3. Нечипорук М. В. Имитационное моделирование развития Ванино-Совгаванского мультимодального транспортного узла / М. В. Нечипорук, В. А. Анисимов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 3. — С. 73–88. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-73-88. — EDN GCPKZY.
4. Шаповалова М. А. Имитационное моделирование системы взаимоотношений участников транспортно-логистического процесса на морском грузовом терминале / М. А. Шаповалова, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 336–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-336-345. — EDN NILVAS.
5. Рожко А. И. Концептуальная структура системы управления транспортно-логистическим проектом на основе имитационного моделирования / А. И. Рожко, А. А. Ханова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2022. — № 1. — С. 60–71. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-1-60-71. — EDN LKZXZT.
6. Özkan E. D. A simulation model for evaluating the cargo transfer alternatives in liquid cargo terminals / E. D. Özkan, U. U. Koçer, S. Nas, Ö. İşlek, E. Tüzgen, A. Doğan // SIMULATION. — 2023. — Vol. 99. — Is. 1. — Pp. 23–39. DOI: 10.1177/00375497221107938.
7. Frazzon E. M. Smart port-hinterland integration: conceptual proposal and simulation-based analysis in Brazilian ports / E. M. Frazzon, J. M. Constante, Y. Triska, J. V. D. S. Albuquerque, J' { }. Martinez-Moya, L. D. S. Silva, A. M. Valente // International Journal of Integrated Supply Management. — 2019. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 334–352. DOI: 10.1504/IJISM.2019.103197.

8. Li X. Simulation study on terminal layout in automated container terminals from efficiency, economic and environment perspectives / X. Li, Y. Peng, J. Huang, W. Wang, X. Song // Ocean & Coastal Management. — 2021. — Vol. 213. — Pp. 105882. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105882.

9. Park K. A Predictive Discrete Event Simulation for Predicting Operation Times in Container Terminal / K. Park, M. Kim, H. Bae // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 58801–58822. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3389961.

10. Kastner M. Integrated Simulation-Based Optimization of Operational Decisions at Container Terminals / M. Kastner, N. Nellen, A. Schwientek, C. Jahn // Algorithms. — 2021. — Vol. 14. — Is. 2. DOI: 10.3390/a14020042.

REFERENCES

1. 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 im. admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.
2. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin, S. S. Val'kova and A. M. Sampiev. "Analysis of seaport bulk cargo warehouse capacity by using simulation modeling." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2022): 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89.
3. Nechiporuk, M. V. and V. A. Anisimov. "Simulation modeling of Vanino-Sovgavan multimodal transport node development." *Bulletin Of Scientific Research Results* 3 (2022): 73–88. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-73-88.
4. Shapovalova, M. A. and A. D. Semenov. "Simulation modeling of the system of relations between the participants of the transport and logistics process at the sea cargo terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo I Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 336–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-336-345.
5. Rozhko, A. I. and A. A. Khanova. "Conceptual structure of transport and logistics project management system based on simulation modeling." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 1 (2022): 60–71. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-1-60-71.
6. Özkan, E. D., A. Doğan, et al. "A simulation model for evaluating the cargo transfer alternatives in liquid cargo terminals." *SIMULATION* 99.1 (2023): 23–39. DOI: 10.1177/00375497221107938.
7. Frazzon, E. M., A. M. Valente, et al. "Smart port-hinterland integration: conceptual proposal and simulation-based analysis in Brazilian ports." *International Journal of Integrated Supply Management* 12.4 (2019): 334–352. DOI: 10.1504/IJISM.2019.103197.
8. Li, X., X. Song, et al. "Simulation study on terminal layout in automated container terminals from efficiency, economic and environment perspectives." *Ocean & Coastal Management* 213 (2021): 105882. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105882.
9. Park, K., M. Kim and H. Bae. "A Predictive Discrete Event Simulation for Predicting Operation Times in Container Terminal." *IEEE Access* 12 (2024): 58801–58822. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3389961.
10. Kastner, M., N. Nellen, A. Schwientek and C. Jahn. "Integrated Simulation-Based Optimization of Operational Decisions at Container Terminals." *Algorithms* 14.2 (2021). DOI: 10.3390/a14020042.

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
Хватов Григорий Михайлович — 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: Gregorykhvatov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. —
 Grand Ph D. 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
Khvatov, Grigoriy M. — 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: Gregorykhvatov@gmail.com

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INDIVIDUAL FACTORS ON THE LEVEL OF FREIGHT RATES

K. V. Prozorov¹, Y. A. Speranskaya², A. E. Slitcan¹

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

² Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

This paper examines the influence of individual factors on the level of freight rates in the local freight market for the transportation of grain cargoes from Russian seaports. The freight market is considered as a complex dynamic system operating under probabilistic laws, with its state determined by numerous factors of varying significance. Identifying the relative importance of these factors makes it possible to reduce the dimensionality of the mathematical model used for analyzing and forecasting the behavior of the studied system. The research presents statistical data on the dynamics of freight rates in the local grain shipping market from the ports of the Russian Federation, identifies the main importing countries of Russian grain, and outlines new trends and directions in grain exports. The dynamics of changes in grain freight rates across the main maritime basins of the Russian Federation — the Azov, Black Sea, Caspian, and Baltic — are analyzed, and the shares of each basin in the total volume of grain exports are determined. The analysis reveals no correlation between the shape of freight rate curves and the direction of transportation, as well as between vessel size and the type of grain cargo transported. A clear dependence was found between transportation distance and the vertical position of the freight rate curve on the graph, which supports the hypothesis that it is possible to estimate freight rate levels for any transport route based on a known rate curve for another route by calculating the difference in distance between them and adjusting the rate by a value proportional to the transportation distance for vessels with minimal ballast passage from the opening position to the loading port.

Keywords: grain export, freight market, freight rate, dynamic system, statistical data series, local market segment, transport vessel, influencing factors, transportation cost, routes.

For citation:

Prozorov, Kirill V., Y. A. Speranskaya and A. E. Slitcan. "Investigation of the influence of individual factors on the level of freight rates." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 682–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-682-690.

УДК 656.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА УРОВЕНЬ ФРАХТОВОЙ СТАВКИ

К. В. Прозоров¹, Я. А. Сперанская², А. Е. Слицан¹

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

² ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье выполнено исследование влияния некоторых факторов на уровень фрахтовых ставок в локальном секторе фрахтового рынка перевозки зерновых культур из портов Российской Федерации. Фрахтовый рынок рассматривается как сложная динамическая система, функционирующая по случайным законам, состояние которой определяется большим количеством факторов, различающихся по степени их значимости. Отмечается, что определение степени значимости этих факторов позволяет снизить размерность математической модели, которая может быть использована при анализе и прогнозировании поведения исследуемой системы. Представлены результаты изучения статистических данных о величине фрахтовых ставок в локальном секторе фрахтового рынка перевозки зерновых грузов из портов Российской Федерации. Определены основные государства-потребители отечественного зерна. Отмечены новые тенденции российского экспорта зерновых грузов и рынки сбыта. Представлена динамика изменения зерновых

фрахтовых ставок по основным морским бассейнам Российской Федерации: Азовскому, Черноморскому, Каспийскому и Балтийскому. Установлены доли каждого бассейна в суммарном объеме экспорта зерновых культур. В результате анализа выявлено отсутствие зависимости между формой кривых фрахтовых ставок и направлением перевозки, а также типоразмером привлекаемого к транспортировке груза судна и видом зернового груза. Установлена очевидная зависимость между дальностью перевозки и расположением кривой фрахтовых ставок на графике по вертикали, на основании которой выдвинута гипотеза о возможности определения уровня фрахтовых ставок для любого направления перевозки при наличии известной кривой ставок для какого-либо из них посредством вычисления разности протяженности между этими двумя маршрутами и корректировки размера ставок для искомого направления на величину, пропорциональную дальности перевозки для судов с минимальным балластным переходом от места открытия позиции судна до места погрузки.

Ключевые слова: экспорт зерна, фрахтовый рынок, фрахтовая ставка, динамическая система, статистический ряд, локальный сектор рынка, транспортное судно, факторы, стоимость перевозки, маршруты.

Для цитирования:

Прозоров К. В. Исследование влияния отдельных факторов на уровень фрахтовой ставки / К. В. Прозоров, Я. А. Сперанская, А. Е. Слицан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 682–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-682-690. — EDN HFJBDN.

Введение (Introduction)

Общее понятие «рынок» подразумевает совокупность процессов и процедур, обеспечивающих обмен отдельными товарами и услугами между покупателями (потребителями) и продавцами (поставщиками). Участниками фрахтового рынка являются *перевозчики*, которые продают провозную способность управляемых ими транспортных судов, и *грузовладельцы*, которые ее покупают для транспортировки груза [1, 2]. Глобальный фрахтовый рынок включает в себя транспортные суда всех типов, принадлежащие многочисленным перевозчикам, которые осваивают морские грузопотоки различной номенклатуры по всему миру.

Огромные масштабы рынка определяют деление его на *секции* или *сектора* (локальные рынки), значительно меньшей размерности, для облегчения их исследования и прогнозирования. Деление рынка на сектора носит весьма условный характер и выполняется в зависимости от выбранного критерия (например, по виду груза, типу судов, региону перевозки и т. п.). Конкретные суда могут учитываться одновременно в нескольких секторах. Главным условием включения судов в определенный сектор фрахтового рынка является лишь их соответствие *критерию*, по которому этот сектор был сформирован. Вследствие этого отдельные сектора фрахтового рынка могут быть как полностью изолированными от других, так и пересекаться в различной степени с другими. Перевозчики могут свободно перемещать свои суда между секторами (например, регионами) для обеспечения наиболее эффективного их использования при отсутствии каких-либо барьеров (Российский рынок в современных условиях является закрытым).

Любой сектор фрахтового рынка является сложной динамической системой, состоящей из множества элементов (транспортных судов) и взаимосвязей между ними (факторов влияния). Эта система, безусловно, является частью глобального фрахтового рынка, а также может частично пересекаться с другими параллельно существующими системами. Четко определить границы рассматриваемой системы и состав ее элементов невозможно, так как часть из них входит одновременно в несколько систем. Таким образом, все элементы и взаимосвязи могут быть разделены на *внутренние* (принадлежат только данной системе), *внешние* (не входят в систему) и *смешанные*. Поведение рассматриваемой системы определяется всей совокупностью факторов, которые в большей или меньшей степени оказывают на нее влияние. Все они непрерывно и непредсказуемо изменяются во времени, что определяет случайный характер функционирования рассматриваемой системы в целом [3, 4].

Целью работы является изучение влияния (степени «значимости») некоторых факторов (маршрут перевозки, типоразмер судна, вид груза) на уровень фрахтовой ставки на локальном рынке. Структура формирования фрахтовой ставки рассматривалась ранее в работах авторов [5].

Количество факторов, оказывающих влияние на стоимость морской перевозки, является весьма значительным, а их изменения носят случайный характер. Поэтому моделирование поведения системы в целях его исследования и прогнозирования очень затруднено, необходимо выделить только значимые факторы, и резко сократить размерность модели (в рамках данного исследования этот вопрос не рассматривается).

Исследование выполнено на конкретном примере локального фрахтового рынка перевозки зерновых культур из портов Российской Федерации. По мнению авторов, данный рынок является *репрезентативным* (доля его в секторе массовых сухих грузов (dry bulk) составляет около 40 %) и он стабильно растет (ежегодный прирост, по данным статистики за период с 2015 г., составляет около 4 %).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В исследовании использованы традиционные методы обработки статистических данных. В качестве материалов для исследования использованы имеющиеся у авторов многолетние (свыше 10 лет) статистические данные об уровне фрахтовых ставок и параметрах грузопотоков в секторе перевозок зерновых грузов из Российской Федерации.

Выполненный анализ статистических данных свидетельствует о том, что на протяжении ряда лет (2015–2025 гг.) Россия занимает лидирующие позиции на мировом рынке сельскохозяйственной продукции по объемам экспорта ряда зерновых культур, ежегодно увеличивая экспорт со своей территории. Начиная с 2020 г. наблюдается тенденция кратного роста объемов экспортных перевозок так называемых *нишевых культур*: ячменя, различных зернобобовых культур, гречихи, проса и др.

Стабильно увеличиваются размеры поставок в страны-импортеры, которые являются традиционными потребителями российского зерна: Египет, Турцию, Иран, Саудовскую Аравию. Одновременно происходит освоение новых рынков сбыта — с 2020 г. отмечается повышенный спрос на российское зерно со стороны ряда крупных стран Африки (Алжир, Мозамбик, Нигерия, Кения, Ливия), Йемен, ОАЭ, Бангладеш, Пакистан, Китай и Индия. Последние, в свою очередь, являются крупнейшими потребителями отечественных нишевых культур, а именно зернобобовых (гороха, чечевицы и нута), кратно увеличив объемы закупок российского зерна в течение последних 8–10 лет. Так, доля Российской Федерации в структуре китайского импорта зерновых достигла своего максимума и возросла почти до 50 %. Подобная ситуация положительно сказывается на структуре российского экспорта зерновых культур, способствуя значительному расширению номенклатуры перевозимых грузов данной категории [4].

Продолжается активное сокращение объемов экспорта зерновых грузов в страны северной Европы, в частности страны ЕС, однако новые рынки сбыта полностью заняли эту нишу российской торговли, существенно расширив размеры экспортных поставок зерновых культур и способствуя переключению отечественного сельскохозяйственного рынка на совершенно иные направления.

В соответствии с прогнозами Минсельхоза России на период до 2030 г., в течение 2026–2031 гг. суммарный объем экспорта различных видов зерновых культур должен увеличиться еще как минимум на 1/3 по сравнению с итогами последних сельскохозяйственных сезонов [5]. Очевидно, что с ростом объемов экспорта зерновых грузов с территории Российской Федерации возрастут объемы морских перевозок данной категории грузов, что определяет актуальность изучения тенденций функционирования сектора dry bulk фрахтового рынка для его участников.

Обсуждение (Discussion)

В рамках проведенной работы был выполнен анализ динамики фрахтового рынка в секторе экспортных зерновых грузов Российской Федерации в период 2012–2025 гг. Исследование проводилось дифференцированно по морским бассейнам: Азовскому, Черноморскому, Каспийскому, Балтийскому. Для каждого бассейна был определен ряд ключевых направлений перевозок

с наибольшими объемами грузопотоков, на которых регулярно котировались фрахтовые ставки. Рассматривались лишь направления, которые стабильно существовали в течение длительного периода времени. Направления, которые эпизодически возникали и исчезали в данном исследовании не рассматривались, как не обладающие достаточной репрезентативностью [6–8].

На рис. 1 представлены графики изменения фрахтовых ставок при перевозке экспортных зерновых грузов из портов Азовского моря в направлении основных портов выгрузки:

- Самсун (Турция, Черное море);
- Бандырма (Турция, Мраморное море);
- Измир (Турция, Эгейское море);
- Мерсин / Искендерун (Турция, Средиземное море);
- Хайфа (Израиль, Средиземное море);
- Александрия (Египет, Средиземное море).

Все указанные маршруты находятся на одной траектории движения.

При перевозках из портов Азовского моря используются в основном морские суда небольшой грузоподъемности (3–7 тыс. т) или суда прибрежного плавания. Выбор в пользу судов указанного типоразмера обусловлен малыми глубинами в портах отправления и небольшой дальностью перевозок. Следует также отметить, что получатели груза из экономических соображений предпочитают не создавать каких-либо долговременных запасов сырья, что обуславливает их желание получать груз регулярно небольшими партиями.

Падения фрахтовых ставок до нулевого уровня в некоторые периоды времени (в 2022 г.) отражают отсутствие у авторов сведений о котировках.

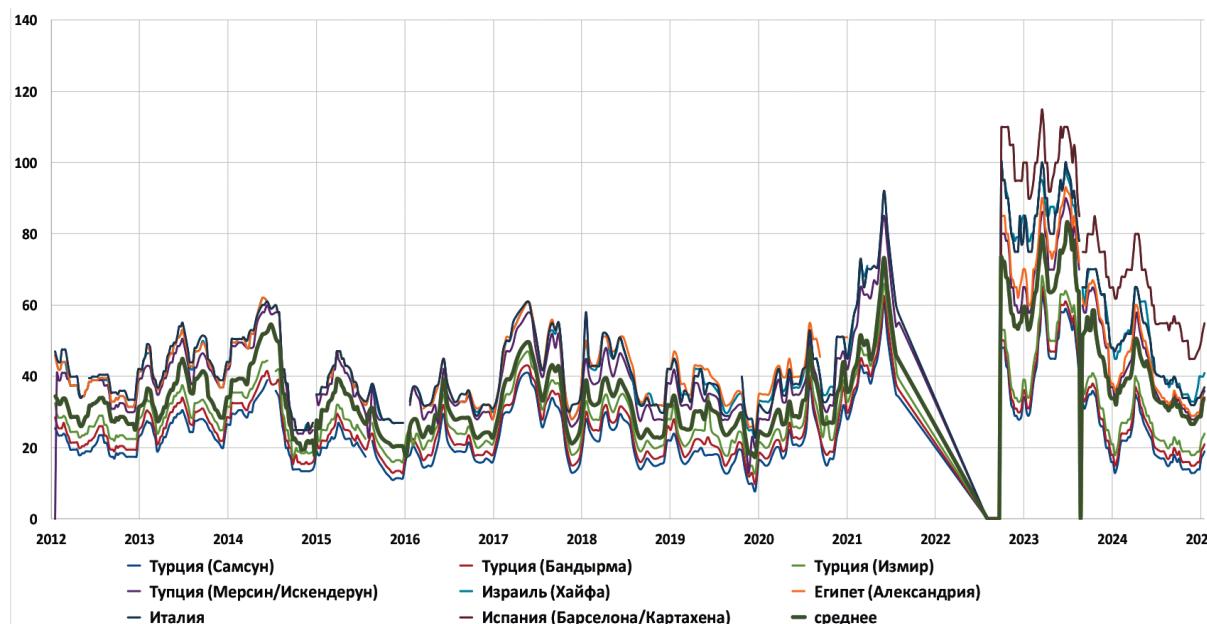


Рис. 1. Динамика изменения фрахтовых ставок на перевозку экспортных зерновых грузов из портов Азовского моря в период 2012–2025 гг. (долл./т)

В портах Черного моря, в отличие от портов Азовского моря, допустимые осадки не накладывают ограничений на грузоподъемность используемых судов, поэтому наибольшее применение в Черноморском бассейне получили суда Handymax и Supramax (30–60 тыс. т), а также Panamax (60–80 тыс. т) с осадкой от 10 м.

На рис. 2 представлены графики изменения фрахтовых ставок при перевозке экспортных зерновых грузов из портов Чёрного моря на судах Handymax и Supramax в направлении основных портов выгрузки:

- Искендерун (Турция, Средиземное море);

- Александрия (Египет, Средиземное море);
- Алжир (Алжир, Средиземное море);
- Бандар Эмам Хомейни (Иран, Персидский залив).

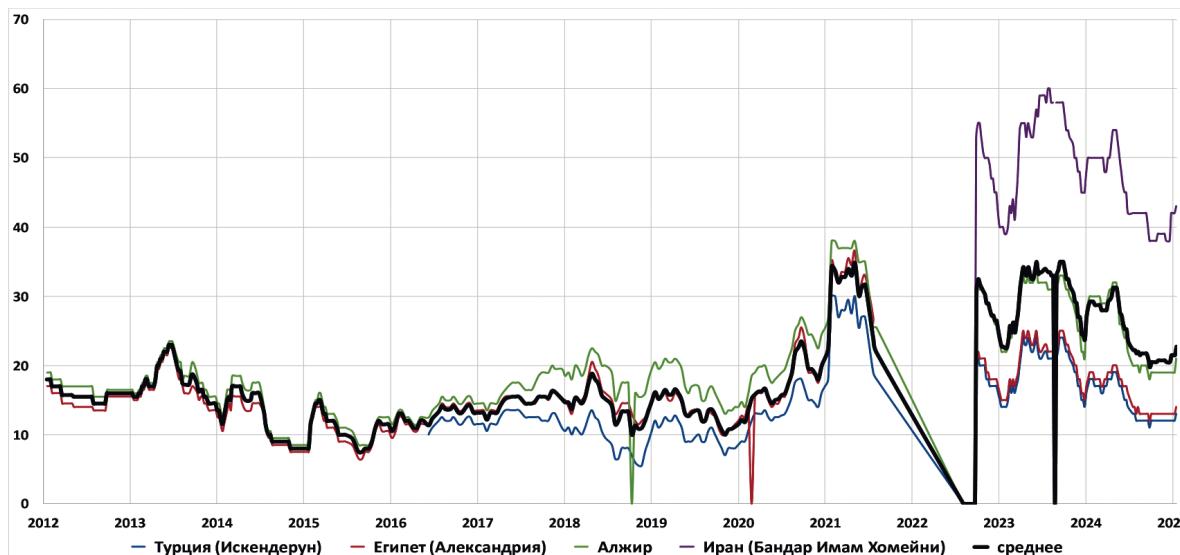


Рис. 2. Динамика изменения фрахтовых ставок на перевозку экспортных зерновых грузов из портов Черного моря в период 2012–2025 гг. на судах Handymax и Supramax (долл./т)

Использование судов Panamax целесообразно при перевозках на значительные расстояния или при наличии больших и стабильных грузопотоков в отсутствие ограничений по осадкам.

На рис. 3 представлены графики изменения фрахтовых ставок при перевозке экспортных зерновых грузов из портов Чёрного моря на судах Panamax в направлении основных портов выгрузки:

- Искендерун (Турция, Средиземное море);
- Александрия (Египет, Средиземное море);
- Алжир (Алжир, Средиземное море);
- Чittагонг (Бангладеш, Бенгальский залив);
- Наньонг (северный Китай, Восточно-Китайское море).

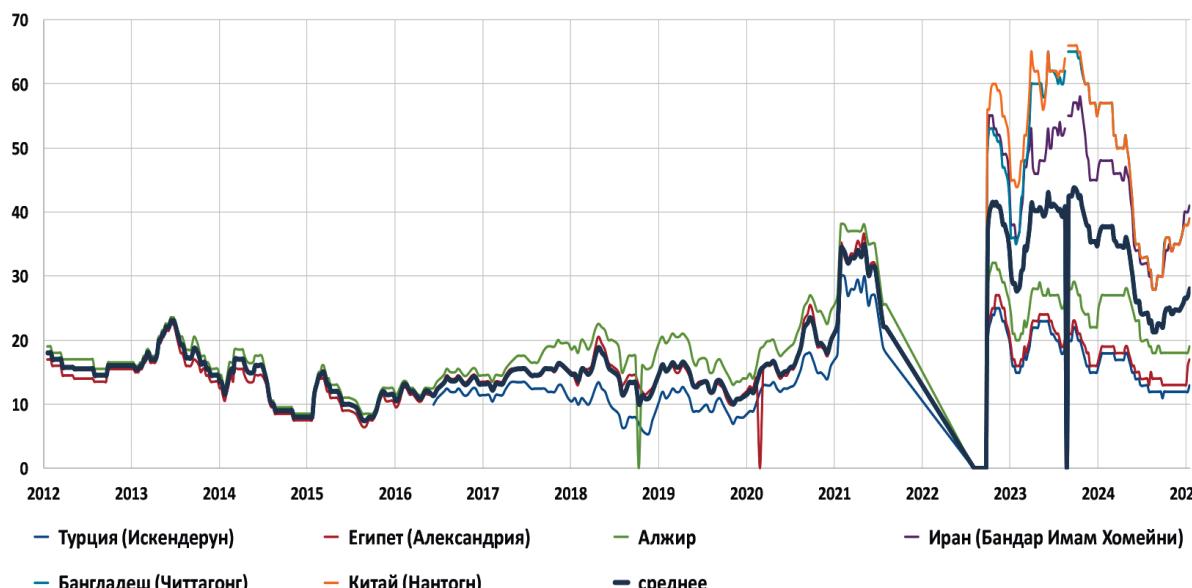


Рис. 3. Динамика изменения фрахтовых ставок на перевозку экспортных зерновых грузов из портов Чёрного моря в период 2012–2025 гг. на судах Panamax (долл./т)

На рис. 4 представлены графики изменения фрахтовых ставок при перевозке экспортных зерновых грузов из портов Балтийского моря в направлении основных портов выгрузки, которые в основном расположены в государствах северной Европы, но иногда достигают Африки (Агадир).

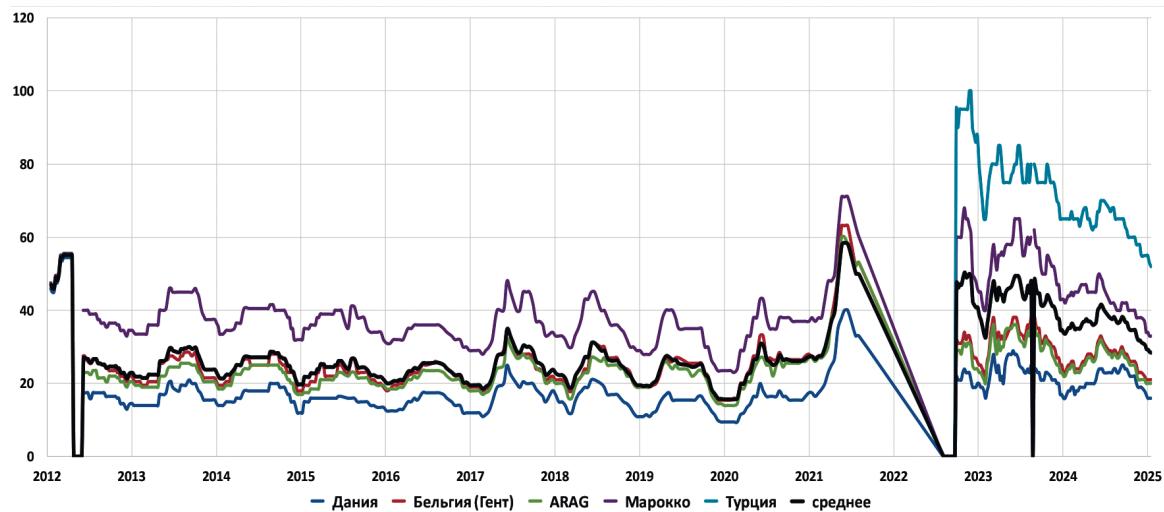


Рис. 4. Динамика изменения фрахтовых ставок на перевозку экспортных зерновых грузов из портов Балтийского моря в период 2012–2025 гг. на судах Panamax (долл./т)

Динамические ряды изменения средних по всем направлениям экспортных фрахтовых ставок при перевозке зерновых культур из портов РФ для различных морских бассейнов представлены на рис. 5. Дифференциация ставок по видам зерновых не выполнялась. Графики, приведенные на этом рисунке, выполнены на основе статистических данных, полученных в течение 10 лет наблюдений, свидетельствуют о схожести формы кривых, имея различия лишь в их расположении по вертикали и некоторые различия в кривизне или в форме кривых. Расположение графиков по вертикальной оси определяется средней дальностью перевозки (чем дальше везут, тем выше фрахтовая ставка) и наличием каких-либо дополнительных расходов судовладельца (оплата прохода каналов, рисков, страховок и т. п.); кривизна определяется спецификой конкретного направления и договора перевозки. Подъемы и падения уровня фрахтовых ставок происходят практически одновременно, но коэффициенты наклона графиков различаются.

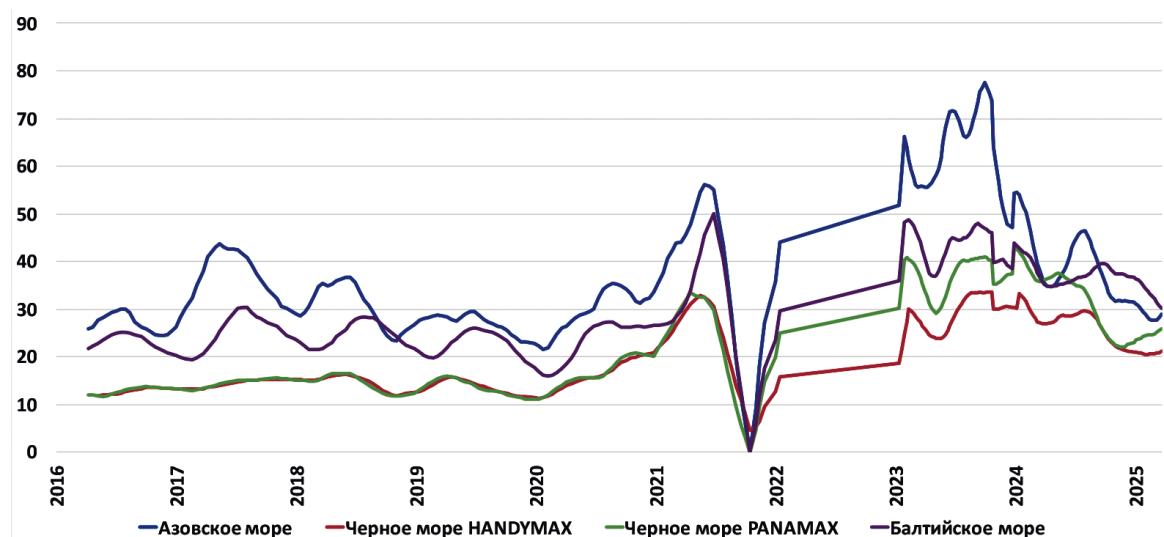


Рис. 5. Динамика изменения фрахтовых ставок на перевозку зерновых грузов из портов РФ для отдельных морских бассейнов и типоразмеров судов в период 2016–2025 гг.

Подавляющая часть экспорта отечественного зерна осуществляется через порты Азово-Черноморского бассейна ввиду их расположения в непосредственной близости к местам выращивания и производства зерновых культур — на долю бассейна приходится около 84 % от общего грузопотока зерновых культур. При этом Азовское и Черное моря примерно равны по объемам перевозок зерна, составляя приблизительно по 42 % каждое. Остальные бассейны значительно уступают по размерам грузопотоков — лишь 16 % от суммарного объема экспорта приходится на Балтийский, Каспийский и Дальневосточный бассейны. Тем не менее для всех бассейнов характерна аналогичная форма кривых фрахтовых ставок несмотря на различия в объемах экспортных перевозок зерновых грузов [9, 10].

Результаты (Results)

Изучение представленных на рис. 1–5 кривых позволяет сделать вывод о том, что тенденции изменения ставок фрахта не зависят от следующих факторов:

- морского бассейна;
- конкретного направления перевозки;
- типоразмера используемых судов;
- конкретного наименования груза.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что любая кривая фрахтовых ставок, относящаяся к конкретному направлению перевозки, типоразмеру судна и виду зернового груза, может быть использована и для иных перевозок рассматриваемого рыночного сектора при оценке значения ставки и определении тенденций ее изменения с учетом поправки на дальность перевозки [11, 12]. Указанные факторы, кажущиеся «значимыми» при формировании величины фрахтовой ставки, в действительности таковыми не являются.

Данные выводы, подтвержденные статистикой многолетних практических наблюдений, свидетельствуют о существовании единого фрахтового рынка РФ в секторе перевозки массовых зерновых грузов. Тенденции, характерные для сектора зерновых грузов, по мнению авторов, имеют место также в иных секторах фрахтового рынка, относящихся к dry bulk, причем суда могут перераспределяться между секторами, так как они приспособлены для перевозки широкой номенклатуры навалочных грузов.

Рассмотренная в качестве примера локальная динамическая система, как и любая иная, всегда стремится занять равновесное положение, когда спрос на тоннаж и его предложение совпадают. Если в каком-либо бассейне происходит «всплеск» фрахтовых ставок на суда определенного типа, т. е. нарушается состояние «равновесия», то в этом случае достаточно быстро произойдет перераспределение судов между бассейнами (при отсутствии барьеров), что будет соответствовать экономическим интересам судовладельцев, и ставки вновь уравняются (система вернется в равновесное состояние). При равновесии спроса и предложения никаких изменений фрахтовых ставок не происходит, и кривая в этом случае должна быть представлена в виде прямой параллельной горизонтальной оси. Подобных участков на рис. 1–5 не наблюдается, что свидетельствует о постоянном движении фрахтового рынка. Амплитуды колебаний ставок характеризуют степень отклонения рынка от равновесия.

В период 2012–2022 гг. амплитуды колебаний фрахтовых ставок для всех направлений перевозок (см. рис. 2) находились в определенном интервале, рассматриваемая динамическая система вела себя стабильно и прогнозируемо, т. е. отклонялась от состояния равновесия и возвращалась обратно по определенным правилам. Начиная с 2022 г., когда произошли геополитические изменения, оказавшие существенное влияние на фрахтовый рынок, амплитуда колебаний выросла, что существенно увеличило волатильность рынка. В 2025 г. разброс кривых фрахтовых ставок по их численным значениям имеет тенденцию к уменьшению, рынок незначительно стабилизируется.

Заключение (Conclusion)

Выполненное исследование является одним из предварительных этапов создания математической модели, описывающей поведение фрахтового рынка. В нем определена степень значимости некоторых эксплуатационных факторов, влияющих на величину фрахтовой ставки. Общеэкономические факторы в научной литературе в достаточной степени изучены, а эксплуатационные, определяющие специфику рынка перевозок средствами морского транспорта, требуют дальнейшего изучения.

Принятая в мировом судоходстве схема деления фрахтового рынка на сектора и расчета соответствующих фрахтовых индексов по виду груза, направлению перевозки и размерам флота не является оправданной — эти критерии не определяют величин фрахтовых ставок, что наглядно продемонстрировано в данном исследовании. В качестве подобного критерия может рассматриваться тип флота, т. е. способность судов перевозить тот или иной вид груза.

Результаты выполненной работы важны для понимания механизма формирования фрахтовой ставки, которая определяется соотношением спроса и предложения на тоннаж определенного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слицан А. Е. Структура системы «Рынок продукции морского транспорта» / А. Е. Слицан, С. А. Слицан // Эксплуатация морского транспорта. — 2006. — № 2(46). — С. 3–6. — EDN HVPJFH.
2. Тимченко Т. Н. Методические основы исследований рынка услуг морского транспорта / Т. Н. Тимченко // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1(63). — С. 14–18. — EDN NYDLNP.
3. Слицан А. Е. Методы оценки интенсивности конкуренции на рынке продукции морского транспорта: монография / А. Е. Слицан. — СПб: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2005. — 106 с. — EDN QQQGJL.
4. Орлов О. В. Фрахтовый рынок / О. В. Орлов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2022. — Т. 12. — № 4–1. — С. 401–405. DOI: 10.34670/AR.2022.11.33.004. — EDN LADNFB.
5. Ситов А. Н. Методика определения фрахтовых индексов / А. Н. Ситов, Я. А. Сперанская, А. Е. Слицан // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 935–945. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945. — EDN DRRABY.
6. Акимова О. В. Анализ фрахтового рынка морских перевозок и способы его регулирования / О. В. Акимова, И. И. Тихонина // Научные труды SWorld. — 2015. — Т. 1. — № 4. — С. 35–39. — EDN VINFGB.
7. Березин А. О. Закономерности развития экспорта зерновых культур из южных регионов России водным транспортом / А. О. Березин, Я. А. Сперанская, К. В. Прозоров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 690–699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699. — EDN FJOTBH.
8. Сперанская Я. А. Тенденции изменения фрахтовых ставок при перевозке массовых сухих грузов / Я. А. Сперанская, А. Н. Ситов, А. Е. Слицан, К. В. Прозоров // Транспортное дело России. — 2024. — № 6. — С. 169–171. — EDN QALAVM.
9. Российский Зерновой Союз. XXV Международный зерновой раунд «Рынок зерна — вчера, сегодня, завтра». Обращение участников XXV Международного зернового раунда // Хлебопродукты. — 2024. — № 7. — С. 20–22. — EDN ABJKND.
10. Скотченко А. С. Плоские и многомерные экономические модели прогнозирования / А. С. Скотченко // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2023. — Т. 13. — № 5–1. — С. 35–44. DOI: 10.34670/AR.2023.52.74.069. — EDN XRMGAI.
11. Ситов А. Н. Оценка адекватности Балтийского сухогрузного индекса как инструмента анализа фрахтового рынка России / А. Н. Ситов, Я. А. Сперанская, К. В. Прозоров, Д. В. Котенев // Транспортное дело России. — 2024. — № 8. — С. 145–147. — EDN AUPOHO.
12. Кузнецов А. Л Порто-ориентированная логистика России в новых геополитических условиях / А. Л. Кузнецов, А. Е. Слицан, А. Н. Ситов // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: Сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября — 202024 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 121–125. — EDN MVEIKQ.

REFERENCES

1. Slitsan, A. E. and S. A. Slitsan. "Struktura sistemy "Rynok produktsii morskogo transporta""." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(46) (2006): 3–6.
2. Timchenko, T. N. "Methodological basics of the studies of maritime transport service market." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 14–18.
3. Slitsan, A. E., Feder. gos. obrazovat. uchrezhdenie Gos. mor. akad. im. admirala S. O. Makarova, Kaf. ekonomiki i osnov upr. and Kaf. org. i tekhnologii perevozok. *Metody otsenki intensivnosti konkurentsii na rynke produktsii morskogo transporta: monografiya* SPb: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2005: 106.
4. Orlov, O. V. "Freight market." *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow* 12.4–1 (2022): 401–405. DOI: 10.34670/AR.2022.11.33.004.
5. Sitov, A. N., Ya. A. Speranskaya and A. E. Slitsan. "Methodology for determining freight indices." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 935–945. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945.
6. Akimova, O. V. and I. I. Tikhonina. "Analiz frakhtovogo rynka morskikh perevozok i sposoby ego regulirovaniya." *Nauchnye trudy SWORLD* 1.4 (2015): 35–39.
7. Berezin, A. O., Ya. A. Speranskaya and K. V. Prozorov. "Patterns of development of export cargo flows of grain crops from the southern regions of Russia." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 690–699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699.
8. Speranskaya, Ya. A., A. N. Sitov, A. E. Slitsan and K. V. Prozorov. "Trends in freight rates for the transportation of dry bulk cargo." *Transport Business Of Russia* 6 (2024): 169–171.
9. "The Russian grain union. XXV international grain round "Grain market — yesterday, today, tomorrow". Address of the participants of the XXV international grain round." *Hleboprodukty* 7 (2024): 20–22.
10. Skotchenko, A. S. "Flat and m multivariate economic forecasting models." *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow* 13.5–1 (2023): 35–44. DOI: 10.34670/AR.2023.52.74.069.
11. Sitov, A. N., Ya. A. Speranskaya, K. V. Prozorov and D. V. Kotenev. "Assessment of the adequacy of the Baltic dry cargo index as an instrument for analyzing the russian freight market." *Transport Business of Russia* 8 (2024): 145–147.
12. Kuznetsov, A. L., A. E. Slitsan and A. N. Sitov. "Russian port-oriented logistics in the new geopolitical conditions." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorskogo-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova": Sbornik statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 30 sentyabrya — 20 2024 goda.* Sankt-Peterburg: Gosudarstvenny universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 121–125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Прозоров Кирилл Владимирович** — доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: prozorovkv@gumrf.ru
- Сперанская Яна Андреевна** — специалист аналитического отдела ФАУ «Российский морской регистр судоходства» 191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 8
e-mail: speranskaia.ia@rs-class.org
- Слицан Андрей Евгеньевич** — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: slicanae@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Prozorov, Kirill V.** — Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: prozorovkv@gumrf.ru
- Speranskaya, Yana A.** —
Specialist of the Analytical Department
FAI «Russian Maritime Register of Shipping»
8 Palace Emb., St. Petersburg, 191186,
Russian Federation
e-mail: speranskaia.ia@rs-class.org
- Slican, Andrey 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: slicanae@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 августа 2025 г.

Received: Aug. 15, 2025

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A SHIP'S HULL

Yu. I. Yudin

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Based on the results of model experiments, this study investigates the potential for their application in mathematical models of a vessel, considering that one of the most critical elements of a ship's mathematical model is the description of the hydrodynamic force loads acting on the hull during controlled motion. These loads are represented as functions of dimensionless hydrodynamic coefficients dependent on various dimensionless kinematic parameters of the vessel's motion. In applied research practice, two main calculation approaches are commonly used to determine the hydrodynamic characteristics of a ship's hull, differing in the specific combination of non-dimensional kinematic parameters: the first uses the drift angle and angular velocity, while the second is based on the transverse component of the ship's linear velocity and angular velocity. The relationships between the dimensionless hydrodynamic characteristics of the hull and the corresponding kinematic parameters of motion are expressed in polynomial form as products of expansion coefficients — i. e., the first and higher-order partial derivatives with respect to the kinematic parameters — by the corresponding motion variables. Model experiments are performed using the harmonic oscillation method, mainly on planar motion mechanisms (PMM) in experimental towing tanks. The results of these experiments yield the partial derivatives of hydrodynamic coefficients. The study explores the possibility of integrating model test data to develop generalized computational formulas that are independent of the specific kinematic parameters considered. A comparative analysis of several calculation methods for determining non-dimensional hydrodynamic characteristics as functions of various dimensionless kinematic parameters is presented. The adequacy of these methods is verified using full-scale experimental data obtained from ships of different displacements and hull configurations. Simulations of controlled ship motion were carried out using the developed mathematical models, taking into account external environmental factors observed during sea trials.

Keywords: mathematical model of a vessel, model experiment, kinematic motion parameters, hydrodynamic forces on the hull, applied problems, standardized circulation parameters, zigzag maneuver, external factors, determination of expansion coefficients, systems analysis.

For citation:

Yudin, Yuri I. "Comparative analysis of methods for calculating the hydrodynamic characteristics of a ship's hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 691–703. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-691-703

УДК 629.12.075

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСА СУДНА

Ю. И. Юдин

ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация

На основе результатов модельных экспериментов исследованы возможности их использования в конкретных математических моделях судна с учетом того, что одним из важнейших элементов математической модели судна является описание силовой нагрузки на корпус судна при его управляемом движении, рассматриваемом в виде зависимости безразмерных гидродинамических характеристик от различных безразмерных кинематических параметров движения судна. Отмечается, что в практике прикладных научных исследований, выполняемых с использованием математической модели судна, предпочтение отдается двум вариантам расчетных методов определения гидродинамических характеристик корпуса судна, отличительной особенностью которых является определенное сочетание кинематических параметров движения судна в безразмерной форме: в первом варианте это угол дрейфа и угловая скорость, во втором —

поперечная составляющая линейной скорости судна и угловая скорость. При этом зависимости безразмерных гидродинамических характеристик корпуса судна от безразмерных кинематических параметров движения представляются в полиномиальной форме в виде произведений коэффициентов разложения, т. е. первых и последующих частных производных по кинематическим параметрам движения, на соответствующие параметры движения. Модельные эксперименты проводятся с использованием метода гармонических колебаний преимущественно на планарных механизмах (*Planar Motion Mechanism* — *PMM*) в опытных бассейнах. Результатами таких экспериментов являются значения частных производных гидродинамических характеристик. В работе исследована возможность совокупного использования результатов модельных экспериментов для получения расчетных формул вне зависимости от рассматриваемых в них кинематических параметров движения судна. Приведены результаты сравнительного анализа использования ряда расчетных методов определения безразмерных гидродинамических характеристик в зависимости от различных безразмерных кинематических параметров движения судна. Для оценки адекватности расчетных методов использованы результаты натурных экспериментов на судах различного водоизмещения и с различной конфигурацией конструкции корпуса. Симуляции управляемого движения рассматриваемых судов выполнены с использованием их математических моделей с учетом воздействия внешних факторов при проведении морских испытаний.

Ключевые слова: математическая модель судна, модельный эксперимент, кинематические параметры движения, усилия на корпусе, практические задачи, нормируемые параметры циркуляции, маневр зигзаг, внешние факторы, определение коэффициента разложения, системный анализ.

Для цитирования:

Юдин Ю. И. Сравнительный анализ методов расчета гидродинамических характеристик корпуса судна / Ю. И. Юдин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 691–703. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-691-703. — EDN HQTREY.

Введение (Introduction)

Для решения многих практических задач в области управления движением судна в реальных условиях плавания необходимо проведение соответствующих экспериментов. Наиболее эффективным способом экспериментальных исследований следует считать симуляции движения судна в заданных условиях плавания, т. е. с учетом воздействия внешних факторов: ветра, волнения, течения и мелководья.

При планировании экспериментальных исследований с использованием математических моделей судна (MMC) необходимо иметь определенные гарантии адекватности MMC [1], [2] как основного инструмента исследования. В этой связи необходимо прежде всего обратить внимание на параметры MMC, так как структура большинства моделей является однотипной, построенной с учетом известных законов динамики движения твердого тела. При этом структура модели обычно зависит от характерных особенностей решаемой с ее помощью практической задачи. Структуры MMC приведены в статье [3].

Параметры базовой MMC, как правило, определяются с использованием результатов ряда натурных и модельных экспериментов, процедура выполнения которых достаточно подробно описана в ряде работ отечественных и зарубежных ученых, выполняющих исследования в области управляемости судна, поэтому в данном случае не требует подробного рассмотрения.

Основным предметом данного исследования является изучение влияния структуры расчетных зависимостей, определяющих значения силовых составляющих нагрузки на корпус судна при его управляемом движении, на основные параметры поворотливости, к которым, в первую очередь, относятся *нормируемые параметры циркуляции* и *параметры маневра зигзаг*. Как известно, расчетные зависимости, определяющие значения гидродинамических характеристик корпуса судна при его движении в MMC, представлены в полиномиальной форме в виде суммы произведений частных производных различного порядка по кинематическим параметрам движения судна (коэффициенты разложения) на соответствующие безразмерные параметры движения. Наибольшее распространение получили два варианта указанных расчетных зависимостей, отличительной особенностью которых является состав кинематических параметров движения судна: первый вариант — угол дрейфа β и угловая скорость r ; второй вариант — поперечная составляющая линейной скорости

судна v и угловая скорость r . При этом в первом варианте используются два расчетных метода определения коэффициентов разложения: β — расчетный метод, не учитывающий форму кормовой части корпуса судна; β_1 — расчетный метод, учитывающий форму кормовой части корпуса судна. Во втором варианте используется один расчетный метод, в текстовой части рис. 2 расчетные параметры обозначены буквой v .

В данной статье рассмотрены оба варианта указанных расчетных зависимостей с целью оценки их влияния на параметры поворотливости судна, так как в данном случае предметом исследования является возможность выбора конкретной ММС без вероятности потери ее адекватности при решении практической задачи управления движением судна. Более того, при выполнении системного анализа результатов модельных экспериментов необходимо иметь максимально возможное количество экспериментальных данных, вне зависимости от того, измерение каких кинематических параметров движения осуществлялось в процессе проведения экспериментов. Следует отметить, что убедительным примером в данном случае является системный анализ результатов модельных экспериментов по определению влияния мелководья на коэффициенты разложения.

Для проведения модельных испытаний выбраны три танкера различного водоизмещения, а именно: BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT), FRONT CLIPPER (158000 DWT); ENERGY CENTAUER (75000 DWT), далее в текстовой части рисунков BG, FC, EC соответственно. Выбор судов обусловлен наличием необходимых для численных экспериментов геометрических характеристик корпуса судна и, что немаловажно, данных натурных испытаний.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существует несколько расчетных методов определения гидродинамических характеристик корпуса судна. Отличительной особенностью этих методов является состав переменных, входящих в расчетные зависимости, т. е. *состав кинематических параметров движения* (рис. 1), частные производные которых представляют собой коэффициенты разложения в формульных выражениях,

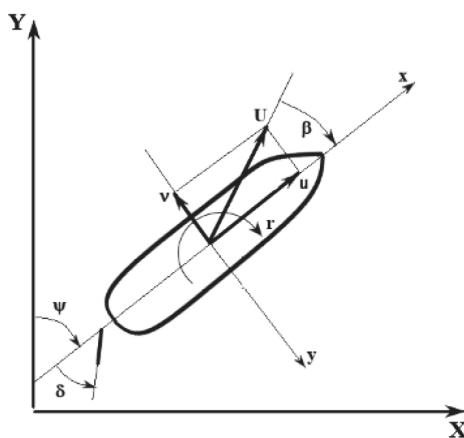


Рис. 1. Координатные системы, кинематические параметры движения

используемых для расчета безразмерных значений гидродинамических характеристик корпуса X'_H , Y'_H , N'_H , имеющих следующий вид:

1-й вариант — кинематические параметры движения: линейная скорость судна U ; угол дрейфа β ; угловая скорость движения r [4]:

$$X'_H = X'_{\beta r} r' \sin \beta + X'_{uu} \cos^2 \beta; \quad (1)$$

$$Y'_H = Y'_\beta \beta + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta} \beta | \beta | + Y'_{rr} r' | r' | + (Y'_{\beta\beta r} \beta + Y'_{\beta rr} r') \beta r'; \quad (2)$$

$$N'_H = N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta} \beta |\beta| + N'_{rr} r' |r'| + \left(N'_{\beta\beta r} \beta + N'_{\beta rr} r' \right) \beta r'. \quad (3)$$

2-й вариант — кинематические параметры движения: продольная составляющая линейной скорости движения судна u ; поперечная составляющая линейной скорости движения судна v ; угловая скорость движения r [5]:

$$X'_H = X'_{vr} v' r' + X'_{uu} u^2; \quad (4)$$

$$Y'_H = Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv} v' |v'| + Y'_{rr} r' |r'| + (Y'_{vvr} v' + Y'_{vrr} r') v' r'; \quad (5)$$

$$N'_H = N'_v v' + N'_r r' + N'_{vv} v' |v'| + N'_{rr} r' |r'| + (N'_{vvr} v' + N'_{vrr} r') v' r' \quad (6)$$

в выражения (1)–(6) входят коэффициенты разложения (частные производные по соответствующим кинематическим параметрам движения, например, $X'_{vr} = X'_H / \partial v' \partial r'$): $X'_{\beta r}$, X'_{uu} , X'_{vr} , $Y'_{\beta r}$, $Y'_{\beta \beta}$, ..., Y'_{vrr} , $N'_{\beta r}$, $N'_{\beta \beta}$, ..., N'_{vrr} ; безразмерные значения кинематических параметров движения: $r = rL / U$ (L — длина между перпендикулярами, далее по тексту — длина), $v' = v/U$.

Как известно, значения коэффициентов разложения являются предметом модельных испытаний с последующим преобразованием их значений в аналитическую форму в зависимости от основных геометрических параметров корпуса судна. Основные геометрические характеристики корпусов танкеров, использованных в настоящем исследовании, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Геометрические параметры корпусов танкеров

Основные геометрические параметры корпуса	Тип судна		
	Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)	Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)	Танкер ENERGY CENTAUR (75000 DWT)
Длина между перпендикулярами L , м	319	270,4	219
Ширина B , м	60	48	32,2
Осадка d , м	22,6	15,97	12,24
Коэффициент полноты водоизмещения C_b	0,8204	0,7978	0,8170
Коэффициент полноты кормовой части площади ватерлинии C_{wa}	0,882	0,912	0,922
Коэффициент продольной полноты кормовой части корпуса C_{pa}	0,740	0,780	0,780

Аналитическая форма зависимостей для определения составляющих гидродинамической силы, образующейся на корпусе судна при его движении, и ее момента относительно вертикальной оси z координатной системы, связанной с судном:

$$X_H = 0,5\rho L d U^2 X'_H;$$

$$Y_H = 0,5\rho L d U^2 Y'_H;$$

$$N_H = 0,5\rho L^2 d U^2 N'_H.$$

Здесь ρ — массовая плотность воды (в расчетах принято значение $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$); d — осадка судна.

Формульные выражения для определения значений коэффициентов разложения при различных вариантах состава кинематических параметров движения, предложенные авторами работ [4]–[11], выглядят следующим образом:

1-й вариант (содержит два вида выражений):

– без учета формы кормовой части корпуса судна (далее в обозначениях — β) [7]:

$$Y'_\beta = 0,5\pi k + 1,4C_b B / L; \quad (7)$$

$$Y'_r - (m' + m'_x) = -1,5C_b B / L; \quad (8)$$

$$Y'_{\beta\beta} = 2,5d(1 - C_b) / B + 0,5; \quad (9)$$

$$Y'_{rr} = 0,343dC_b / B - 0,07; \quad (10)$$

$$Y'_{\beta rr} = 5,95d(1 - C_b) / B; \quad (11)$$

$$Y'_{\beta\beta r} = 1,5dC_b / B - 0,65; \quad (12)$$

$$N'_\beta = k; \quad (13)$$

$$N'_\beta = -0,54k + k^2; \quad (14)$$

$$N'_{\beta\beta} = -0,96d(1 - C_b) / B + 0,066; \quad (15)$$

$$N'_{rr} = 0,5C_b B / L - 0,09; \quad (16)$$

$$N'_{\beta rr} = -(0,5dC_b / B - 0,05); \quad (17)$$

$$N'_{\beta\beta r} = \left[57,5(C_b B / L)^2 - 18,4C_b B / L + 1,6 \right], \quad (18)$$

Здесь $k = 2d/L$, $m', m'_x = m, m_x / 0,5\rho L^2 d$ (m — масса судна; m_x — присоединенная масса корпуса судна при его продольном движении);

— с учетом формы кормовой части корпуса судна (далее в обозначениях — $\beta 1$) [4]:

$$Y'_\beta = 0,5\pi k + 1,9257(C_b B / L)\sigma_a;$$

$$Y'_r = 0,25\pi k + 0,052e'_a - 0,457 + (m' + m'_x);$$

$$Y'_{\beta\beta} = \begin{cases} 52,9[d(1 - C_b) / B]K - 0,125, & \text{если } C_b < 0,6; \\ -0,170e'_a K(B / d) + 1,08, & \text{если } 0,6 < C_b \leq 0,75; \\ 4,17kC_b e'_a - 0,4475, & \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } K \leq 0,35; \\ 0,92kC_b e'_a + 0,373, & \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } kC_b e'_a \leq 0,28; \\ -0,4784K(B / d) + 1,3 & \text{— в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$Y'_{rr} = \begin{cases} -0,755kC_b e'_a + 0,248, & \text{если } kC_b e'_a \leq 0,28; \\ 0,243(dC_b / B)e'_a - 0,131, & \text{если } kC_b e'_a > 0,28; \end{cases}$$

$$Y'_{\beta rr} = -1,386C_b e'_a K + 1,29;$$

$$Y'_{\beta\beta r} = \begin{cases} 306,52(C_b B / L)K - 2,315, & \text{если } C_b \leq 0,6 \text{ и } (C_b B / L)K < 0,008; \\ -186,14(C_b B / L)K + 0,902, & \text{если } C_b \leq 0,6 \text{ и } (C_b B / L)K \geq 0,008; \\ 13,018C_b - 9,278, & \text{если } 0,6 < C_b \leq 0,75; \\ -42,654(C_b B / L) + 5,9, & \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } K \leq 0,3; \\ -6,92kC_b e'_a + 1,87, & \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } kC_b e'_a \geq 0,28; \\ 0,781e'_a K - 0,432 - \text{в остальных случаях}; & \end{cases}$$

$$N'_{\beta} = k \left\{ 150,668 \left[\frac{d(1-C_b)}{B} e'_a K \right]^2 - 23,819 \left[\frac{d(1-C_b)}{B} e'_a K \right] + C \right\};$$

$$C = \begin{cases} 1,976, & \text{если } (C_b B / L) e'_a K \geq 0,137; \\ 1,802, & \text{если } (C_b B / L) e'_a K < 0,137; \\ 1,902, & \text{если } e'_a k C_b \geq 0,28; \end{cases}$$

$$N'_r = -0,54k + k^2 - 0,048e'_a K + 0,037;$$

$$N'_{\beta\beta} = 43,857 \left\{ \left[d(1-C_b) / B \right] e'_a K \right\}^2 - 3,671 \left[d(1-C_b) / B \right] e'_a K + 0,086;$$

$$N'_{rr} = 0,15K - 0,068;$$

$$N'_{\beta rr} = -0,409C_b + 0,27;$$

$$N'_{\beta\beta r} = -0,826 \left[d(1-C_b) / B \right] e'_a - 0,026;$$

$$e'_a = \frac{e_a}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{(B+d)^2}}};$$

$$e_a = \frac{L}{B} (1 - C_{pa});$$

$$K = \left(\frac{1}{e'_a} + \frac{1,5}{L / B} - 0,33 \right) (0,95\sigma_a + 0,40);$$

$$\sigma_a = \frac{1 - C_{wa}}{1 - C_{pa}};$$

2-й вариант (далее в обозначениях — v) [7]:

$$Y'_v = - (0,5\pi k + 1,4C_b B / L); \quad (19)$$

$$Y'_r = -1,5C_b B / L + (m' + m'_x); \quad (20)$$

$$Y'_{vv} = -[2,5d(1-C_b)/B + 0,5]; \quad (21)$$

$$Y'_{rr} = 0,343dC_b/B - 0,07; \quad (22)$$

$$Y'_{vrr} = -[5,95d(1-C_b)/B]; \quad (23)$$

$$Y'_{vvr} = 1,5dC_b/B - 0,65; \quad (24)$$

$$N'_v = -k; \quad (25)$$

$$N'_r = -0,54k + k^2; \quad (26)$$

$$N'_{vv} = -[-0,96d(1-C_b)/B + 0,066]; \quad (27)$$

$$N'_{rr} = 0,5C_bB/L - 0,09; \quad (28)$$

$$N'_{vrr} = 0,5dC_b/B - 0,05; \quad (29)$$

$$N'_{vvr} = -[57,5(C_bB/L)^2 - 18,4C_bB/L + 1,6]. \quad (30)$$

Нетрудно заметить, что идентичность выражений (7)–(18) и (19)–(30), неслучайна так как $v' = -\sin \beta$.

Результаты (Results)

Результаты расчетов значений гидродинамических производных для рассматриваемых танкеров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения гидродинамических производных

Производные	Тип судна								
	Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)			Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)			Танкер ENERGY CENTAUR (75000 DWT)		
	« β »	« β »	« v »	« β »	« β »	« v »	« β »	« β »	« v »
$Y'_{\beta(v)}$	0,357	0,439	-0,439	0,287	0,384	-0,384	0,295	0,344	-0,344
Y'_{r}	0,119	0,118	0,118	0,058	0,102	0,102	0,012	0,083	0,083
$Y'_{\beta\beta(vv)}$	0,609	0,669	-0,669	0,548	0,668	-0,668	0,564	0,674	-0,674
Y'_{rr}	0,054	0,036	0,036	0,101	0,021	0,021	0,091	0,037	0,037
$Y'_{\beta\beta r(vrr)}$	0,445	0,403	-0,403	0,541	0,400	-0,400	0,534	0,414	-0,414
$Y'_{\beta\beta r(vvr)}$	0,149	-0,186	-0,186	0,078	-0,252	-0,252	0,776	-0,184	-0,184
$N'_{\beta(v)}$	0,140	0,142	-0,142	0,122	0,118	-0,118	0,114	0,112	-0,112
N'_{r}	-0,055	-0,056	-0,056	-0,044	-0,050	-0,050	-0,043	-0,048	-0,048
$N'_{\beta\beta(vv)}$	0,012	0,001	-0,001	0,009	0,0014	-0,0014	0,010	-0,0008	0,0008
N'_{rr}	-0,018	-0,013	-0,013	-0,020	-0,019	-0,019	-0,024	-0,030	-0,030
$N'_{\beta\beta r(vrr)}$	-0,066	-0,105	0,105	-0,053	-0,083	0,083	-0,064	-0,105	0,105
$N'_{\beta\beta r(vvr)}$	-0,149	-0,130	-0,130	-0,140	-0,147	-0,147	-0,157	-0,219	-0,219

Результаты расчетов усилий на корпусах танкеров в зависимости от угла дрейфа представлены на рис. 2.

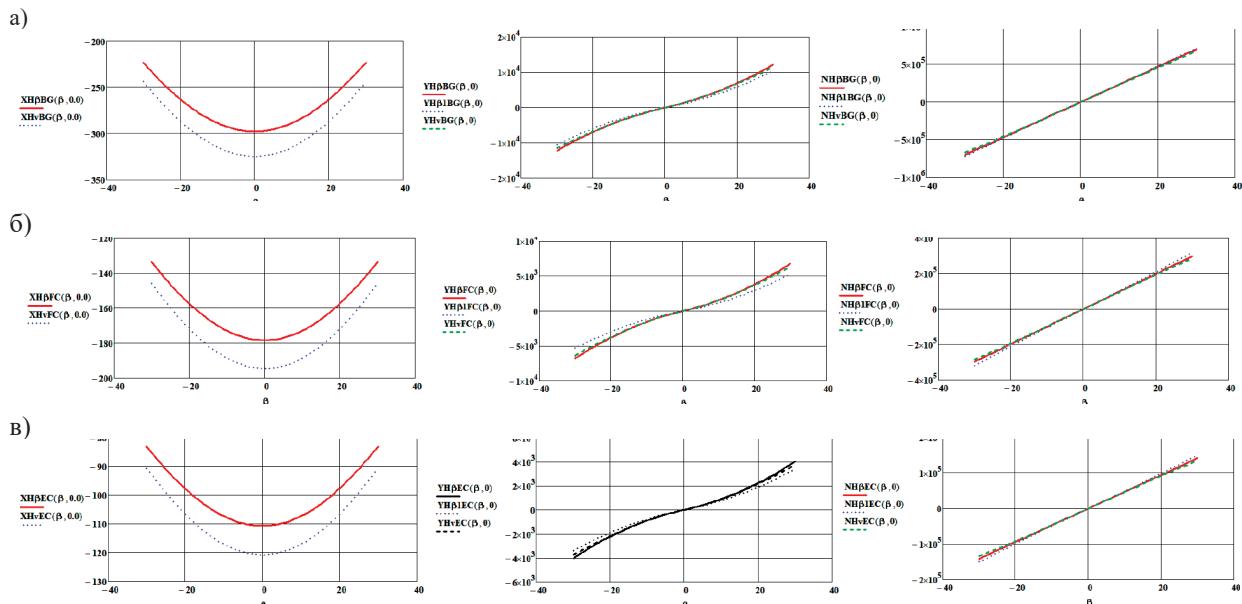


Рис. 2. Зависимость усилий от угла дрейфа на корпусе танкеров:
a — BRIGHTOIL GLORY; б — FRONT CLIPPER; в — ENERGY CENTAUER

Видно, что существенных расхождений в значениях усилий на корпусах танкеров в зависимости от использованного расчетного метода не наблюдается. Существуют некоторые расхождения в крайних точках, т. е. на границах выбранного интервала значений угла дрейфа ($-30^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$). Для убедительности в табл. 3 приведены значения поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе танкеров и ее момента, которые подтверждают несущественные отклонения значений указанных параметров, рассчитанных с использованием различных расчетных методов.

Таблица 3

Значения гидродинамической силы Y_H (кН) и вращающего момента N_H (кН·м)
на корпусе при движении со скоростью $U = 5,5$ уз (2,827 м/с) и с углом дрейфа $\beta = 30^\circ$

По результатам симуляции движения судна	По результатам расчета производных « $\beta 1$ »	По результатам расчета производных « $\beta \beta$ »	По результатам расчета производных « $v v$ »
Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)			
$Y_H = 1,141 \cdot 10^4$ кН	$Y_H = 1,046 \cdot 10^4$ кН	$Y_H = 1,221 \cdot 10^4$ кН	$Y_H = 1,141 \cdot 10^4$ кН
$N_H = 6,695 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 7,202 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 7,015 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 6,698 \cdot 10^5$ кН·м
E, %	E%(Y_H) = 8,3 % E%(N_H) = 7,0 %	E%(Y_H) = 6,6 % E%(N_H) = 4,6 %	E%(Y_H) = 0 % E%(N_H) = 0 %
Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)			
$Y_H = 6,346 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 5,315 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 6,794 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 6,348 \cdot 10^3$ кН
$N_H = 2,840 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 3,190 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 2,976 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 2,842 \cdot 10^5$ кН·м
E, %	E%(Y_H) = 16,2 % E%(N_H) = 11,0 %	E%(Y_H) = 6,6 % E%(N_H) = 4,6 %	E%(Y_H) = 0 % E%(N_H) = 0 %
Танкер ENERGY CENTAUR (75000 DWT)			
$Y_H = 3,735 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 3,391 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 4,004 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 3,736 \cdot 10^3$ кН
$N_H = 1,338 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 1,503 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 1,402 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 1,339 \cdot 10^5$ кН·м
E, %	E%(Y_H) = 9,2 % E%(N_H) = 10,9 %	E%(Y_H) = 6,7 % E%(N_H) = 4,6 %	E%(Y_H) = 0 % E%(N_H) = 0 %

Пределы значений угла дрейфа выбраны неслучайно, так как при выполнении циркуляций подавляющего большинства судов различного типа они находятся в указанном диапазоне.

Обсуждение (Discussion)

Для проверки адекватности MMC, в которых использованы рассмотренные ранее в работе расчетные методы, произведен ряд симуляций движения танкеров при выполнении маневров, параметры которых нормированы в соответствии с Резолюцией ИМО (IMO, 2002a), — MSC.137(76).

Симуляции движения танкеров выполнялись с учетом условий, в которых проводились морские испытания (SEA TRIAL). Необходимо отметить в данном случае, что танкеры во время испытаний имели полную загрузку. Наличие внешних факторов в районах испытаний, оказывало влияние на параметры маневров. Так, например, при выполнении циркуляции танкера BRIGHTOIL GLORY скорость ветра составляла 10,3 м/с, а курсовой угол ветра в момент начала циркуляции был равен 15° с правого борта. Испытания двух других танкеров проводились при ветре, скорость которого не превышала 4 м/с, что практически не оказывало влияния на параметры маневрирования. В то же время в районе проведения морских испытаний танкера ENERGY CENTAUSER наблюдалось течение со скоростью 1,9 уз, направлением на NNW, что привело к деформации кривой циркуляции. Все факторы внешней среды были учтены при проведении симуляций движения танкеров. Так как условия при выполнении маневров зигзаг были более благоприятными с точки зрения влияния на параметры маневрирования, в симуляциях этого маневра внешние факторы не учитывались.

Значения нормируемых параметров поворотливости танкеров: A_D — выдвиг; TD — тактический диаметр; T_R — прямое смещение; D_C — диаметр установившейся циркуляции; T_{360} — время цикла циркуляции; U_{360} — скорость танкера в конце цикла циркуляции; 1st — первый угол зарыскивания; 2nd — второй угол зарыскивания, а также сравнительная оценка в процентном выражении с аналогичными параметрами, полученными по результатам морских испытаний, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значение параметров поворотливости по результатам симуляции движения с использованием различных MMC

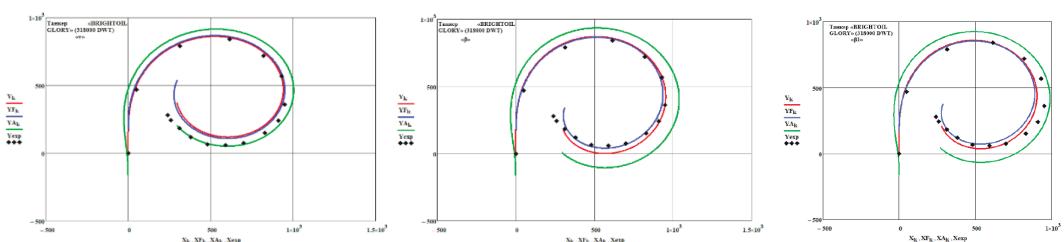
Тип судна	Параметры поворотливости	Результаты морских испытаний	Значения параметров поворотливости по результатам симуляций		
			Вид модели (переменные)		
			u, v, r («v»)	U, β, r (« β »)	U, β, r (« $\beta 1$ »)
Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)	A_D , м	795	857 (7,2 %)	862 (7,8 %)	851 (6,6 %)
	TD , м	943	933 (1,1 %)	932 (1,2 %)	891 (5,5 %)
	T_R , м	465	463 (0,4 %)	408 (12,3 %)	405 (12,9 %)
	D_C , м	751	705 (6,1 %)	738 (1,7 %)	700 (6,8 %)
	T_{360} , с	914	716 (21,7 %)	887 (3,0 %)	856 (6,7 %)
	U_{360} , уз	2,8	4,37 (36 %)	3,8 (26,3 %)	3,8 (26,3 %)
	1 st (10/10), °	12,9	12,6 (2,3 %)	12,3 (4,7 %)	13,1 (1,5 %)
	2 nd (10/10), °	38,9	38,8 (0,3 %)	38,9 (0 %)	38,1 (2,1 %)
	1 st (20/20), °	15,4	15,2 (1,9 %)	15,2 (1,3 %)	14,0 (9,1 %)
	2 nd (20/20), °	17,5	17,9 (2,2 %)	18,1 (3,3 %)	19,1 (8,4 %)
Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)	A_D , м	861	779 (9,5 %)	781 (9,3 %)	847 (1,6 %)
	TD , м	776	852 (8,9 %)	827 (6,2 %)	812 (4,4 %)
	T_R , м	416	389 (6,5 %)	385 (7,5 %)	381 (8,4 %)
	D_C , м	687	724 (5,1 %)	714 (3,8 %)	704 (24 %)
	T_{360} , с	777	847 (8,2 %)	825 (5,8 %)	898 (13,4 %)

Таблица 4
 (Окончание)

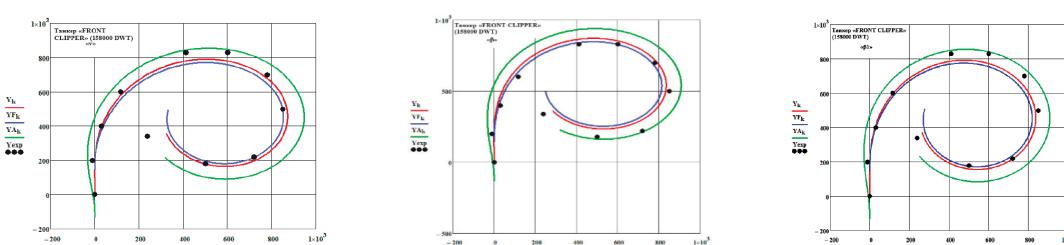
Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)	U_{360} , y_3	3,7	3,2 (13,5 %)	3,3 (10,8 %)	3,3 (10,8 %)
	1 st (10/10), °	12,2	11,4 (6,6 %)	12,0 (1,6 %)	11,8 (3,3 %)
	2 nd (10/10), °	23,5	23,4 (0,4 %)	23,2 (1,3 %)	24,2 (2,9 %)
	1 st (20/20), °	13,3	13,4 (0,7 %)	12,7 (4,5 %)	13,1 (1,5 %)
Танкер ENERGY CENTAUER (75000 DWT)	2 nd (20/20), °	15,8	15,6 (1,3 %)	16,0 (1,3 %)	15,3 (3,2 %)
	TD, м	634	645 (1,7 %)	647 (2,0 %)	608 (4,1 %)
	T_R , м	194	248 (21,7 %)	248 (21,7 %)	240 (19,2 %)
	D_C , м	527	557 (5,4 %)	534 (1,3 %)	578 (8,8 %)
	T_{360} , с	557	613 (9,1 %)	558 (0,2 %)	559 (0,4 %)
	U_{360} , y_3	6,1	5,8 (4,9 %)	6,1 (0 %)	6,2 (1,6 %)
	1 st (10/10), °	8,0	9,2 (13 %)	8,2 (2,4 %)	8,6 (7,0 %)
	2 nd (10/10), °	17,8	18,2 (2,2 %)	17,1 (3,9 %)	17,4 (2,2 %)
	1 st (20/20), °	12,7	13,7 (7,3 %)	13,2 (3,8 %)	12,0 (5,5 %)
	2 nd (20/20), °	15,6	14,6 (6,4 %)	14,7 (5,8 %)	17,5 (10,8 %)

В графической форме результаты симуляций представлены на рис. 3 и 4. Траектория циркуляции, полученной при проведении морских испытаний, отмечена знаками различной формы, координаты которых определены по результатам оцифровки экспериментальных кривых.

а)



б)



в)

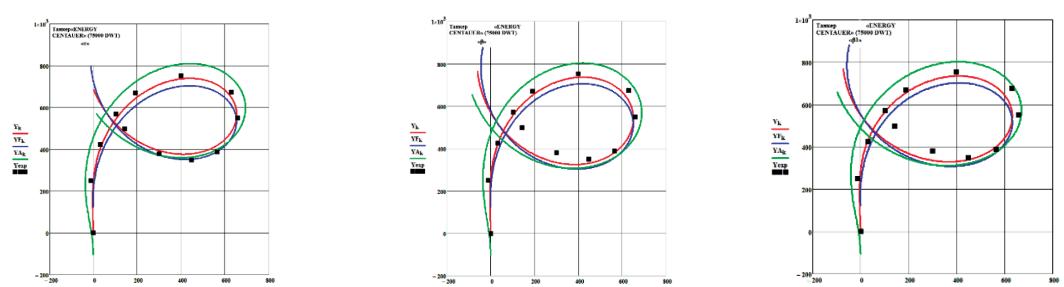


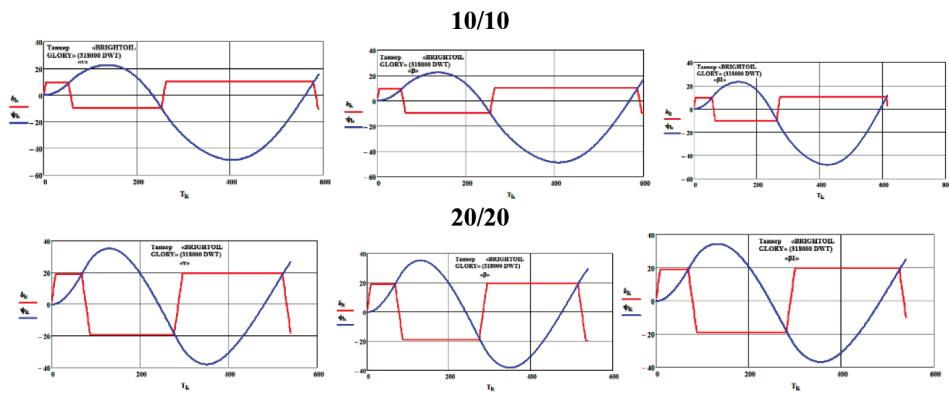
Рис. 3. Результаты симуляции циркуляций:

а — танкер BRIGHTOIL GLORY; б — танкер FRONT CLIPPER; в — танкер ENERGY CENTAUER

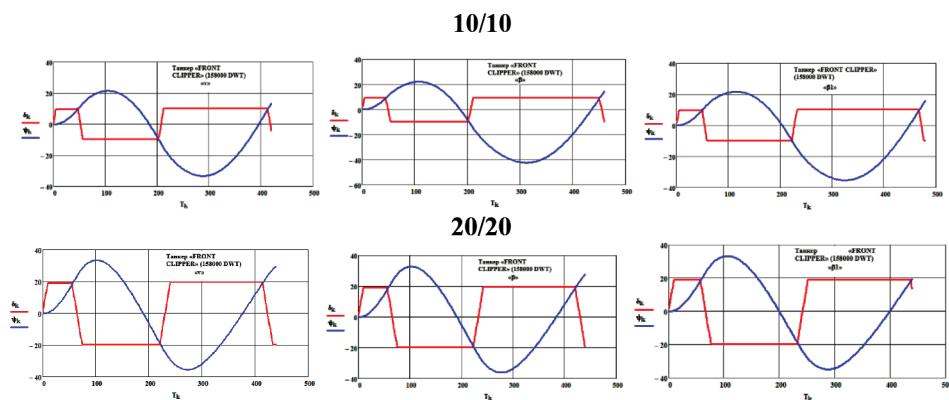
Условные обозначения:

красным цветом обозначена траектория движения центра тяжести танкеров;
 синим — носовой оконечности танкеров; зеленым — кормовой оконечности

a)



б)



в)

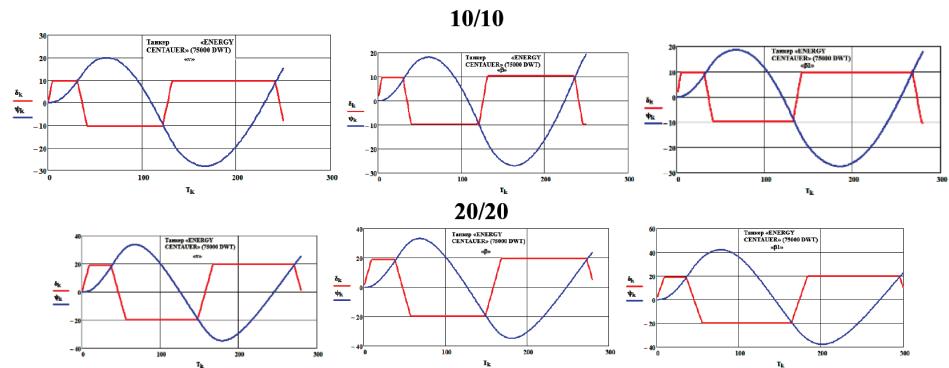


Рис. 4. Результаты симуляции маневра зигзаг: а — танкер BRIGHTOIL GLORY; б — танкер FRONT CLIPPER; в — танкер ENERGY CENTAUER

Условные обозначения:

красным цветом показана кривая изменения угла перекладки руля;
синим цветом — кривая изменения курса

Параметры, кроме углов зарыскивания, в результатах симуляции маневров зигзаг не рассматривались, так они они не входят в число нормируемых.

Заключение (Conclusion)

Для проведения экспериментальных исследований с использованием ММС можно уверенно использовать модели, имеющие различные кинематические параметры, используемые в качестве переменных. При этом структура расчетных зависимостей, определяющих значения силовых составляющих нагрузки на корпус судна при его управляемом движении, не оказывает заметного

влияния на основные параметры поворотливости. Кроме того, при проведении системного анализа результатов модельных экспериментов можно использовать максимально допустимое количество экспериментальных данных, вне зависимости от того, какие кинематические параметры движения использовались в качестве заданных в процессе проведения этих экспериментов. Тем не менее мы не можем с уверенностью утверждать, что при симуляции «сильных» маневров рассмотренный подход имеет место, так как значения углов дрейфа, например, при лаговом движении судна значительно превышают предельное значение, принятое в данном исследовании. Этот фактор является важной проблемой, требующей дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дыда А. А. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных / А. А. Дыда, К. Н. Пляшешник, И. И. Пушкарев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 716–725. DOI: 10.2182 1/2309-5180-2020-12-4-716-725. — EDN KVHSLE.*
2. *Смоленцев С. В. Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.2182/2309-5180-2019-11-1-7-21. — EDN NSMBPQ.*
3. *Юдин Ю. И. Метод расчета гидродинамических характеристик корпуса судна в условиях мелководья / Ю. И. Юдин // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 3(112). — С. 27–38. DOI: 10.34046/aumsuomtll2/5. — EDN URXYEJ.*
4. *Aoki I. On the Prediction Method for Maneuverability of a Full Scale Ship / I. Aoki, K. Kijima, Y. Furukawa, Y. Nakiri // Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. — 2006. — Vol. 3. — Pp. 157–165. DOI: 10.2534/jjasnaoe.3.157.*
5. *Yoshimura Y. Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model). / Y. Yoshimura // Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction. — Tokyo, 2005. — Pp. 1–6.*
6. *Kim D. J. Tune of hydrodynamic coefficients based on empirical formula by using manoeuvring performance indices of a ship / D. J. Kim, Y. G. Kim // Journal of the Society of Naval Architects of Korea. — 2020. — Vol. 57. — Is. 6. — Pp. 331–344. DOI: 10.3744/snak.2020.57.6.331.*
7. *Kijima K. On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition / K. Kijima, T. Katsuno, Y. Nakiri, Y. Furukawa // Journal of the society of naval architects of Japan. — 1990. — Vol. 1990. — Is. 168. — Pp. 141–148. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1990.168_141.*
8. *Li M. Simulation calculation and comprehensive assessment on ship maneuverabilities in wind, wave, current and shallow water / M. Li // Proceedings of MARSIM and ICSM'90, Tokyo. — 1990. — Vol. 403. — Pp. 459–465.*
9. *Muhammad A. H. Characteristics of Turning Circle and Zig-Zag Manoeuvres of An Indonesian Ferry Ship in Shallow Water / A. H. Muhammad, D. Paroka, S. Rahman, M. R. Firmansyah, T. P. Putra // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1052. — Is. 1. — Pp. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1052/1/012036.*
10. *The Specialist Committee on Esso Osaka. Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC. / The Specialist Committee on Esso Osaka // 23rd International Towing Tank Conference. Proceedings of the 23rd ITTC. — Vol. II. — Zürich: ITTC, 2002. — Pp. 581–617.*
11. *Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / H. Yasukawa, Y. Yoshimura // Journal of Marine Science and Technology. — 2015. — Vol. 20. — Is. 1. — Pp. 37–52.*

REFERENCES

1. Dyda, A. A., K. N. Plyasheshnik and I. I. Pushkarev. “Developing a model of the dynamics of unmanned vessel on course based on the experimental data.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 716–725. DOI: 10.2182/2309-5180-2020-12-4-716-725.
2. Smolentsev, S. V. and D. V. Isakov. “A simple analytical model of ship movement.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.2182/2309-5180-2019-11-1-7-21.
3. Yudin, Yu. I. “Method of calculating hydrodynamic characteristics of a ship’s hull in shallow water conditions.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(112) (2024): 27–38. DOI: 10.34046/aumsuomtll2/5.

4. Aoki, I., K. Kijima, Y. Furukawa and Y. Nakiri. "On the Prediction Method for Maneuverability of a Full Scale Ship." *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* 3 (2006): 157–165. DOI: 10.2534/jjasnaoe.3.157.
5. Kim, D. J. and Y. G. Kim. "Tune of hydrodynamic coefficients based on empirical formula by using manoeuvring performance indices of a ship." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 57.6 (2020): 331–344. DOI: 10.3744/snak.2020.57.6.331.
6. Kijima, K., T. Katsuno, Y. Nakiri and Y. Furukawa. "On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition." *Journal of the society of naval architects of Japan* 1990.168 (1990): 141–148. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1990.168_141.
7. Li, M. "Simulation calculation and comprehensive assessment on ship maneuverabilities in wind, wave, current and shallow water." *Proceedings of MARSIM and ICSM'90, Tokyo* 403 (1990): 459–465.
8. Muhammad, A. H., T. P. Putra, et al. "Characteristics of Turning Circle and Zig-Zag Manoeuvres of An Indonesian Ferry Ship In Shallow Water." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1052.1 (2021): 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1052/1/012036.
9. The Specialist Committee on Esso Osaka. "Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC." *23rd International Towing Tank Conference. Proceedings of the 23rd ITTC—Vol. II*. Zürich: ITTC, 2002: 581–617.
10. Yasukawa, H. and Y. Yoshimura. "Introduction of {MMG} standard method for ship maneuvering predictions." *Journal of Marine Science and Technology* 20.1 (2015): 37–52.
11. Yoshimura Y. "Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model)." *Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction*. Tokyo, 2005: 1–6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Юдин Юрий Иванович—
доктор технических наук, профессор
Государственный морской университет
им. адм. Ф. Ф. Ушакова
353925, Новороссийск, пр. Ленина, 93.
e-mail: udinui@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yudin, Yuri I.—
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Ushakov Maritime
State University
353925, Novorossiysk, av. Lenina, 93.
e-mail: udinui@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 18 июля 2025 г.
Received: July 18, 2025

**ANALYSIS OF KEY ISSUES IN VERSION 6.2.0
OF THE SIXTH EDITION OF THE IHO S-44 STANDARDS
FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS**

Yu. G. Firsov

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

*The paper examines the principal issues of Version 6.2.0 of the sixth edition of the International Hydrographic Organization (IHO) Standards for Hydrographic Surveys S-44, adopted in October 2024. Although Version 6.2.0 is largely identical to Version 6.1.0, it introduces two new subsections in paragraph 3.8 related to seabed characteristics and their inclusion in the specification matrix. In October 2024, the draft of Version 6.2.0 was circulated to national hydrographic offices for review, and in November 2024 the Department of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense of the Russian Federation submitted its official feedback with recommendations to the IHO. The feedback of the Russian side and the comments provided by the Chairs of the IHO Working Groups and the IHO Secretariat, published in Circular Letter No. 21/2025, are analyzed in detail. The analysis highlights several inconsistencies and contradictions in the Working Groups' comments, as well as the lack of justification for referencing the IHO Manual on Hydrography (C-13), which is outdated and does not reflect the current state of modern digital hydrography. Special attention is given to one of the most significant changes in Version 6.2.0: the clarification of the term Total Horizontal Uncertainty (THU) and the introduction of a new method for its computation based on the standard deviations of sonar antenna coordinates, which requires further substantiation. The newly added glossary terms *a priori* and *a posteriori* uncertainty are discussed, and the current approach to obtaining *a posteriori* uncertainty is critically assessed. It is proposed that the seventh edition of S-44 should reinstate and formalize the statistically based method for assessing posterior accuracy through the analysis of overlaps between main and check survey lines, as previously recommended in the fourth and fifth editions. This methodology should also be reflected in the updated IHO Manual C-13. The need to elaborate an alternative method for real-time water-level corrections using high-precision geodetic heights of tide-gauge benchmarks (RTK-tide), briefly mentioned in recent editions of S-44, is substantiated. Recommendations are provided for presenting this method in the updated C-13, including the use of geoid models to determine height differences between the geoid and chart datum. Additional potential clarifications and improvements to Version 6.2.0 are identified, which may be appropriate to include in the forthcoming seventh edition of the IHO S-44 Standards.*

*Keywords: IHO Standards for Hydrographic Surveys (S-44), Version 6.2.0, total horizontal uncertainty (THU), standard deviation, *a priori* and *a posteriori* uncertainty, accuracy assessment of bathymetric surveys, IHO Manual C-13, RTK-tide, geoid-based water-level corrections.*

For citation:

Firsov, Yury G. "Analysis of key issues in version 6.2.0 of the sixth edition of the IHO S-44 standards for hydrographic surveys." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 704–716. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-704-716.

УДК 551.462.33(268)

**АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ВТОРОЙ ВЕРСИИ
ШЕСТОЙ РЕДАКЦИИ СТАНДАРТОВ S-44
МЕЖДУНАРОДНОЙ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Ю. Г. Фирсов

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

Рассмотрены основные проблемы издания 6.2.0 шестой редакции Стандартов S-44 Международной Гидрографической организации, опубликованные в октябре 2024 г. Указано, что версия 6.2.0 шестой редакции Стандартов S-44 практически полностью соответствует версии 6.1.0 шестой редакции, за исключением добавления двух новых подпунктов в п. 3.8, касающихся природы дна с включением соответствующих параметров в матрицу спецификаций. Отмечается, что в октябре 2024 г. проект второй версии издания 6.2.0 шестой редакции Стандартов S-44 Международной Гидрографической организации был направлен на рассмотрение национальным гидрографическим организациям для получения отзыва. В ноябре 2024 г. Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации направило в Международную Гидрографическую организацию свой отзыв с рекомендациями. По результатам рассмотрения российских рекомендаций и отзывов других пяти государств Международная Гидрографическая организация подготовила Циркулярное письмо № 21/2025 от 24 апреля 2025 г. В приложении к Циркулярному письму представлены отзывы шести государств-членов и комментарии председателей рабочих групп и Секретариата Международной Гидрографической организации. В данной статье обсуждаются отзывы Управления навигации и океанографии и комментарии к нему председателей рабочих групп и Секретариата МГО. При этом отмечена несостоительность и противоречивость некоторых из этих комментариев и необоснованность ссылок на Учебник по гидрографии Международной гидрографической организации, известный как С-13, изданный в 2005 г. и актуализированный в 2011 г. Отмечается, что ряд материалов этого учебника устарели и не отвечают реалиям современной цифровой гидрографии. Подчеркивается, что одним из главных изменений в версии 6.2.0 шестой редакции Стандартов S-44 можно считать уточнение термина «суммарная горизонтальная неопределенность» и новый метод расчета этого параметра на основе стандартных отклонений координат антенны сонара, который не является оптимальным и требует дальнейшего уточнения. Обоснована необходимость изложение вопросов альтернативного метода определения поправок уровня в реальном масштабе времени на основе высокоточного определения геодезических высот реперов уровенных постов в трех последних редакциях Стандартов S-44 (4-й — 6-й). Даны рекомендации по изложению этого вопроса в актуализированной версии — Учебнике С-13 Международной гидрографической организации с учетом использования моделей геоида для получения разности высот геоида и нуля глубин на уровенном посту. Обсуждаются другие возможные изменения и уточнения текущего издания 6.2.0 шестой редакции, которые в дальнейшем будут целесообразно внести в проект новой (седьмой) редакции Стандартов S-44 Международной Гидрографической организации.

Ключевые слова: S-44(6.2.9) МГО, суммарная горизонтальная неопределенность, расчет горизонтальной неопределенности, оценка точности съемки, апостериорная модель неопределенностей, учебник МГО С-13, поправки уровня относительно геоида.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Анализ проблем второй версии шестой редакции Стандартов S-44 Международной гидрографической организации / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 704–716. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-704-716. — EDN JRFRMD.

Введение (Introduction)

Современная цифровая / электронная гидрография требует разработки адекватных норм и правил применения постоянно появляющихся новых технологий. Эта задача исторически была возложена на Международную гидрографическую организацию (МГО), которая с 1968 г. осуществляла подготовку специальных публикаций S-44 Стандартов на гидрографическую съемку. Первые три Стандарта были во многом схожи, поскольку отражали уровень развития существовавших гидрографических технологий второй половины XX в. Однако появление в 1998 г. четвертой редакции Стандартов S-44 внесло существенные изменения в требования, предъявляемые к гидрографической съемке, отражая новые возможности гидрографии, которая стала электронной и цифровой.

В четвертой редакции Стандарта S-44 была предпринята первая попытка обобщить опыт использования новых средств и методов зарождавшей новой цифровой гидрографии. При этом были представлены новые парадигмы электронной гидрографии, которые получили развитие

в последующих редакция Стандартов: в пятой редакции, вышедшей в 2008 г. и в шестой редакции — издания: 2020 г. (6.0.0), (6.1.0)¹ и 2024 г. (6.2.0)².

Анализу четвертой редакции Стандартов S-44 (1998) посвящены работы [1] и [2], а основные положения пятой редакции Стандартов S-44 (2008), включая рассмотрения вопросов оценки точности планового положения, представлены в работах [3] и [4].

Стандарты на гидрографическую съемку МГО изначально не имели статуса нормативного документа, но задавали минимальные стандарты точности съемок, которые следовало выполнять государствам для подготовки навигационных морских карт (НМК) с целью обеспечения безопасности мореплавания согласно Конвенции СОЛОС. В текущей шестой редакции изданий 6.2.0 сделана попытка придать Стандартам более «нормативный» характер и распространить их на батиметрические съемки, выполняемые для нужд, отличных от обеспечения только безопасности мореплавания.

Анализ издания 6.0.0 шестой редакции Стандарта S-44 приведен в работе [5], а особенности проекта издания 6.1.0, включая ряд критических замечаний и рекомендаций, содержатся в исследовании [6]. В работе [7] рассмотрены те изменения, которые были включены в издание 6.1.0 для его утверждения в качестве нового издания 6.2.0 шестой редакции S-44 (6.2.0).

Целью статьи является анализ отдельных спорных положений принятой в октябре 2024 г. шестой редакции издания 6.2.0 Стандартов S-44 и ряда рекомендаций, изложенных в документе, представленном Управлению навигации и океанографии (УНиО) в ответ на запрос МГО в виде отзыва с рекомендациями по проекту шестой редакции издания 6.2.0.

Выполненное исследование основано на изучении текстов трех последних редакций Стандартов S-44 и сопутствующих им российских и зарубежных публикаций, а также личного опыта автора по эксплуатации многолучевых эхолотов в составе аппаратно-программных комплексов на основе зарубежных электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС) в соответствии с требованиями пятой редакции Стандартов S-44. Предполагается, что анализ положений шестой редакции Стандарта S-44 может быть полезен при подготовке нового отечественного нормативного документа по современной гидрографии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В 2024 г. в Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации (УНиО МО РФ) поступило циркулярное письмо из МГО № 35/2024, в котором государствам — членам МГО предлагалось в срок до 29.11.2024 г. проголосовать по вопросу об утверждении очередного исправленного и дополненного издания «Стандартов МГО на гидрографические съемки» S-44 (издание 6.2.0).

Проект S-44 (6.2.0) был предварительно одобрен на 16-м заседании Комитета МГО по гидрографическим услугам и стандартам — HSSC (IHO Hydrographic Services and Standards Committee), состоявшемся в Токио (Япония) в период с 27 по 31 мая 2024 г. Проект этого документа был размещен на сайте МГО в разделе проектов публикаций МГО³.

В сентябре 2020 г. МГО выпустила исходный вариант шестой редакции Стандартов на гидрографические съемки S-44 (издание 6.0.0) и спустя два года, в 2022 г. — уточненный вариант (издание 6.1.0), в который были внесены незначительные уточнения исходного варианта.

В шестой редакции S-44 (2022) появилось много новшеств, которые не только уточнили и конкретизировали отдельные положения предыдущих двух редакций, но и ввели ряд существенных изменений, которые можно охарактеризовать в качестве новых парадигм современной

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys, International Hydrographic Organization, Special Publication No 44, 6th Edition 6.1.0, 2022. — 42 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.1.0.pdf.

² IHO Standards for Hydrographic Surveys, International Hydrographic Organization, Special Publication No 44, 6th Edition 6.2.0, 2024. — 40 p [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.2.0_adopted.pdf.

³ The International Hydrographic Organization. Draft Publications: <https://iho.int/en/draft-publications>.

электронной гидрографии. Введенные в шестой редакции С-44 (2022) новшества были изложены в работе [7].

В Проекте издания 6.2.0 «Стандартов МГО на гидрографические съемки» С-44 были внесены следующие дополнения.

1. Во введении уточнена цель публикации шестой редакции С-44 (2024), и текст первого абзаца представлен в виде:

This publication aims to provide a set of standards for hydrographic surveys and a tool for classification of other bathymetric datasets, primarily used to compile navigational charts essential for the safety of navigation, knowledge and the protection of the marine environment.

В авторском переводе на русский язык этот первый абзац «Введения» может быть представлен в следующем виде:

цель данной публикации — предоставить свод стандартов на гидрографические съемки и инструмент для классификации других батиметрических наборов, в основном используемые для составления морских навигационных карт, необходимых для обеспечения безопасности мореплавания, а также улучшения изученности и защиты морской среды.

Добавлена фраза: «...a tool for classification of other bathymetric datasets ...», характеризующая использование нового понятия «матрица спецификаций», впервые введенного в шестой редакции С-44 (2022), что вполне логично и не может вызывать возражений.

2. В словарь шестой редакции С-44 (2022 г.) добавлены определения двух терминов:

A priori uncertainty: Uncertainty based on estimations prior to and throughout the survey, being without examination or analysis.

A posteriori uncertainty: Uncertainty based on collected survey data to verify that the survey results are within the requirements.

Авторский перевод определений этих двух новых терминов может быть представлен в виде:

Априорная неопределенность — неопределенность, основанная на априорных оценках, сделанных до и в ходе съемки без изучения или анализа.

Апостериорная неопределенность — неопределенность на основе собранных данных съемки для проверки соответствия результатов исследования установленным требованиям.

Необходимость включения указанных терминов можно только приветствовать. Следует также отметить, что шестая редакция Стандартов предлагает своеобразную трактовку априорной и апостериорной оценки точности батиметрической съемки. Информация по контролю точности содержится в приложениях *B*, *C*, а также в приложении *D*. Вопрос об апостериорной оценке точности батиметрической съемки, приведенной в приложении *B*, предполагает использование специального «тестового» полигона — участка дна с детальной цифровой моделью рельефа, которая будет использоваться для сравнения с батиметрической моделью — сеткой, полученной в результате выполненной съемки. При этом использование глубин контрольных галсов для последующего их сравнения с поверхностью батиметрической модели — сетки (грида), полученной по результатам обработки данных съемки на основных галсах, в тексте шестой редакции (в приложении *B*) вообще не рассматривается.

3. В п. 2.7 «Уровень доверительной вероятности» во втором абзаце добавлено очень актуальное пояснение, с учетом которого англоязычный текст представлен в следующем виде:

It must be noted that confidence levels (e. g. 95 %) depend on the assumed statistical distribution of the data and are calculated differently for one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) quantities. In the context of this standard, which assumes normal distribution of error, the 95 % confidence level for 1D quantities (e. g. depth) is defined as 1.96 x standard deviation. The 95 % confidence level for 2D quantities (e. g. position) is defined as 2.45 x standard deviation where the largest standard deviation of the x or y axis is used.

В авторском переводе этот абзац может быть представлен в следующем виде:

Необходимо отметить, что уровень доверительной вероятности (например, 95 %) зависит от предполагаемого статистического распределения данных и рассчитываются

по-разному для одномерных (1D) и двумерных (2D) величин. В контексте данного стандарта, в котором предполагается нормальное распределение ошибок, 95%-й уровень доверительной вероятности для одномерных значений (напр., глубина) определяется как 1,96, умноженное на стандартное отклонение, а 95 % уровень доверительной вероятности для двумерных величин (например, местоположение) определяется как 2,45, умноженное на стандартное отклонение, в качестве которого будет использована наибольшая величина стандартного отклонения по осям x или y .

В двух последних редакциях С-44 (2008, 2020, 2022) при оценке планового положения используется термин «стандартное отклонение» (*Standard Deviation*) без конкретного указания формулы для расчета и соответствующей доверительной вероятности. Этот вопрос был впервые рассмотрен в работе [3] и подробно освещен в работах [6], [7], в которых были показаны различные меры точности для расчета планового положения, используемые в зарубежной практике. Отмечалось, что только при использовании меры точности в виде Circular Standard Error — CSE (круговая стандартная ошибка) может быть использована формула

$$THU = 2,45CSE = 2,45 \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2}, \quad (1)$$

где σ_x и σ_y — стандартные отклонения по осям x или y .

Таким образом, для расчета местоположения с 95 %-м уровнем доверительной вероятности для двумерных величин в виде THU предлагается использовать не наибольшую величину стандартного отклонения по осям x или y , а среднее значение стандартных отклонений по осям x или y в соответствии с формулой (1).

4. Наибольшие изменения в проекте редакции 6.2.0 состоят в добавлении двух новых подпунктов в п. 3.8.

В п. 3.8.1 отмечается, что обычно регистрируется сила обратного акустического рассеяния дна, поскольку эти данные могут помочь в определении характера дна без дополнительных затрат на исследования. Сила обратного рассеяния напрямую связана с такими характеристиками дна, как состав осадочных пород (например, плотность, размер зерен, наличие раковин), шероховатость (например, песчаная рябь, гравийное дно, коренные породы), бентос (например, колонии раковин, коралловые рифы, луга морской травы, погребенные организмы) или другие геологические компоненты (например, жидкий ил, мелководные газовые зоны).

В 2015 г. рабочая группа GeoHab по обратному рассеянию BSWG⁴ разработала Руководство по оптимизации сбора и использования акустического обратного рассеяния «Измерения обратного рассеяния гидролокаторами, картирующими морское дно. Руководящие принципы и рекомендации»⁵. Следует обратить внимание на то, что эти рекомендации предназначены для оптимальной регистрации данных обратного рассеяния и могут не способствовать получению оптимальной батиметрии. В зависимости от целей съемки могут потребоваться компромиссы.

Информация, содержащаяся в новом п. 3.8.2, касается определения характеристик дна с помощью оптического обратного рассеяния пассивными датчиками (съемка Земли) или активными датчиками (лидар). Важнейшими характеристиками являются спектральный диапазон длин волн видимого света (от синего до красного), а также плотность точек, или пространственное разрешение. Они позволяют количественно оценить параметры, влияющие на обратное рассеяние, и облегчают определение батиметрии (глубин) или характеристик морского дна. В 2023 г. проектная группа по спутниковой батиметрии разработала Руководство по спутниковой батиметрии B-13⁶, в котором содержатся рекомендации по анализу обратного рассеяния, полученного со спутников. Существует

⁴ Backscatter Working Group. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geohab.org/backscatter-working-group>.

⁵ Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations. DOI: 10.5281/zenodo.10089261.

⁶ International Hydrographic Organization (IHO) Publication, B-13. “Satellite-Derived Bathymetry Best Practice Guide” [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ihonet/uploads/user/pubs/bathy/B_13_Ed100_032024.pdf.

ограниченное количество стандартов для интерпретации интенсивности лидара. Американское общество фотограмметрии и дистанционного зондирования (ASPRS) предлагает Руководство по формату лидарных данных, а в различных публикациях приводятся методы коррекции интенсивности, на которую влияют инструментальные и экологические вариации. Кроме того, стандарты Национального гидрографического управления содержат рекомендации по оптимальным условиям сбора и форматам данных.

Введение указанных новых подпунктов в п. 3.8 не вызывает возражений и знаменует дальнейшее внедрение спутниковых технологий дистанционного зондирования Земли, лазерных измерений, а также программных продуктов дистанционного зондирования донного грунта в современную цифровую гидрографию.

Обсуждение (Discussion)

В апреле 2025 г. Рабочая группа по гидрографическим съемкам (HSWG) и Секретариат МГО в своем циркулярном письме (ЦП) № 21/2025 от 24.04.25 г. с приложением сообщили об утверждении очередного, исправленного и дополненного издания «Стандартов МГО на гидрографические съемки» S-44 (6.2.0). В приложении к указанному циркулярному письму Member States' Responses to IHO CL 35/2024 and Comments from the Working Groups' Chairs and IHO Secretariat представлены отзывы шести государств-членов на Циркулярное письмо МГО 35/2024, а также комментарии председателей рабочих групп и Секретариата МГО. Копия текста циркулярного письма № 21/2025 от 24.04.25 г. представлена на рис. 1.

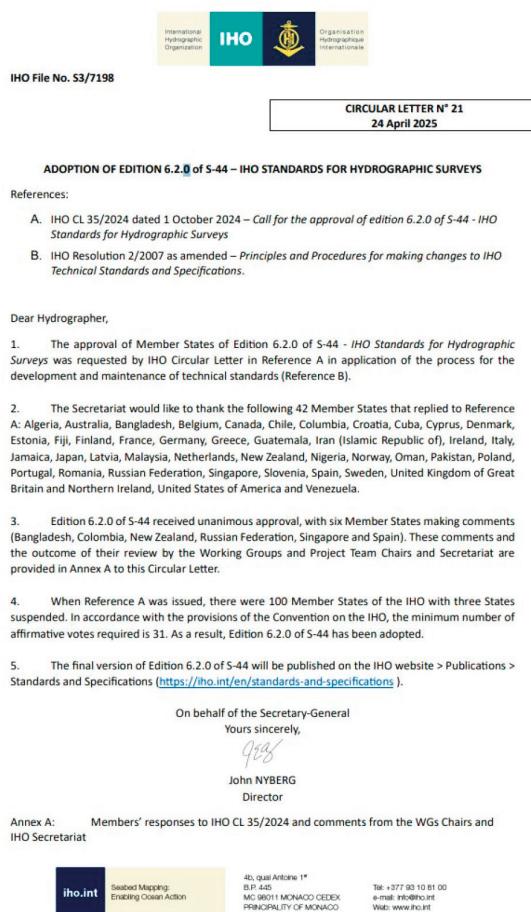


Рис. 1. Копия текста циркулярного письма HSWG и Секретариат МГО № 21/2025 от 24.04.25 г.⁷

⁷ Adoption Of Edition 6.2.0 of S-44 — IHO STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS. CIRCULAR LETTER N° 21 24 April 2025. https://ihodata.org/uploads/user/circular_letters/eng_2025/CL21_2025_EN_v1.pdf.

Приведем фрагмент Приложения к циркулярному письму HSWG № 21/2025 от 24.04.25 г., касающийся рекомендаций Российской Федерации, содержащихся в отзыве УНиО, и ответ HSWG в официальном переводе 280 «Центрального картографического производства» ВМФ.

Российская Федерация проголосовала за введение проекта в качестве текущей версии S-44. При этом были отмечены следующие положения (выделены автором курсивом):

В результате проведенного анализа можно дать следующие комментарии к проекту издания 6.2.0 публикации S-44:

1. *Все нововведения проекта издания 6.2.0 публикации S-44 актуальны, не вызывают возражений и могут быть приняты к утверждению в качестве текущей версии S-44.*

2. *Последнее предложение пункта 2.7 проекта издания 6.2.0 публикации S-44 предлагается изложить следующим образом: «95 % для двумерных величин (например, местоположение) определяется как 2,45, умноженные на стандартное отклонение, где стандартное отклонение местоположения приближенно выражено как средняя величина стандартного отклонения по осям x и y».*

3. *В проекте издания 6.2.0 публикации S-44 недостаточно проработаны вопросы, связанные с альтернативным методом определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезических высот опорных точек пунктов наблюдения приливов и нулей карт с использованием точных ГНСС обсерваций в геоцентрической системе координат, известной как RTK-tide.*

4. *В проекте издания 6.2.0 публикации S-44 для апостериорной оценки качества результатов батиметрической съемки по-прежнему предлагается использовать только испытательный полигон. О необходимости использования контрольных поперечных (промерных) галсов при съемке рельефа не упоминается. Необходимость контроля результатов постобработки съемки рельефа с использованием анализа, основанного на статистическом сравнении глубин основных галсов и поперечных галсов относительно выбранной категории съемки, в шестом издании S-44 вообще не упоминается. На наш взгляд, этот очевидный недостаток шестого издания стандарта S-44 МГО должен быть исправлен при подготовке следующего издания.*

Комментарий Рабочей группы по гидрографическим съемкам (Hydrographic Surveys Working Group — HSWG) и Секретариата МГО (выделены автором курсивом):

В ответ на вопросы, поднятые Российской Федерацией, председательствующая группа S-44, предлагает следующие ответы:

1. *Принято к сведению с благодарностью.*

2. *Применяемый в настоящее время коэффициент 2,45 x стандартное отклонение для расчета суммарной горизонтальной неопределенности (THU) является упрощением, которое используется с 5-го издания 2008 года. В издании 5 публикации S-44 THU была описана как «Было сделано предположение, что неопределенность изотропна» (обозначает свойство быть единообразной независимо от направления), после чего следует: «Это делает нормальное распределение симметричным по окружности, что позволяет описать радиальное распределение погрешностей относительно истинного значения одним числом».*

В изд. 6.0.0 и 6.1.0 это было выражено следующим образом: «В настоящем стандарте, для удобства использования, принимается положение, что допустимая горизонтальная неопределенность одинакова в обоих направлениях. Поэтому, предполагая нормальное распределение ошибок, неопределенность местоположения выражается одним числом».

В изд. 6.2.0 мы уточнили, что в упрощенной формуле следует использовать наибольшие из стандартных отклонений [по оси] X или Y.

При оценке неопределенности необходимо исходить из наихудшего случая, и как в издании 5, так и в изданиях 6.0.0/6.1.0, она [неопределенность] описывается как симметричная/равная по окружности в обоих измерениях.

Если формула $DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ (доверительная вероятность 63 %), которую можно преобразовать в радиальную неопределенность R_{95} (доверительная вероятность 95 %) путем умножения на 1,73, мы получаем формулу $R_{95} = 1,73\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$.

Если предположить, что максимально допустимая неопределенность для Особой категории THU = 2 м, и рассчитать допустимую среднеквадратическую (RMS) неопределенность по обратной упрощенной формуле:

$$RMS = \frac{\text{Допустимая THU}}{2,45},$$

то получим максимально допустимую RMS неопределенность $\sigma = 0,816$ м.

Чтобы доказать, что формулы дают одинаковый результат, используем $\sigma = 0,816$ м как для x , так и для y в формуле $R_{95} = 1,73 \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$, и получим $R_{95} = 2$ м. То, что мы действительно вычисляем с помощью обеих формул, на самом деле является «вектором», который при равных σ_x и σ_y имеет длину $1,414 \times \sigma$, в нашем случае 1,15 м.

Этот вопрос обсуждался на нескольких заседаниях рабочей Группы по гидрографическим съемкам (HSWG), и все сошлись во мнении, что текущее определение является правильным, но мы понимаем проблему, поднятую Россией. Поэтому в настоящее время мы не предлагаем никаких изменений, но дальнейшие разъяснения будут представлены в пересмотренном Руководстве по гидрографии С-13.

3. Мы полагаем, что этот вопрос должен рассматриваться в публикации МГО С-13, а не в Стандарте S-44. Мы передали это председателю Проектной Группы Руководства по гидрографии (Manual on Hydrography Project Team — MHPT).

4. Важность контрольных поперечных (промерных) галсов признается как часть процесса обеспечения качества. Однако такие процедурные элементы больше подходят для С-13. Нынешний коэффициент “2,45 x Стандартное отклонение” для расчета суммарной горизонтальной неопределенности является упрощением, используемым со времени 5-го издания 2008 года. В 5-м издании публикации S-44 THU была описана следующим образом: «Было сделано предположение, что неопределенность изотропна» (обозначает свойство быть единообразной независимо от направления), после чего следует: «Это делает нормальное распределение симметричным по окружности, что позволяет описать радиальное распределение погрешностей относительно истинного значения одним числом».

Председатель HSWG и Секретариат МГО благодарят Российскую Федерацию за отклик и призывают принять участие в обсуждении следующей редакции S-44.

Положительным моментом в разъяснениях рабочей группы HSWG в отношении алгоритма расчета THU можно считать признание наличие проблемы, но описание метода расчета THU во второй версии шестой редакции Стандарта S-44 остается без изменений. Таким образом, в текущей версии шестой редакции Стандарта S-44 (6.2.0) расчет THU (п. 2.7)⁸ теперь выполняется по следующей формуле:

$$THU = 2,45\sigma_{\max}. \quad (2)$$

где σ_{\max} — максимальная из величин σ_x и σ_y .

В комментариях, представленных HSWG⁹, имеются очевидные противоречия. С одной стороны, утверждается, что «...допустимая горизонтальная неопределенность одинакова в обоих направлениях». Таким образом, $\sigma_x = \sigma_y$. Вместе с тем в издании 6.2.0 S-44 HSWG отмечается, что в упрощенной формуле расчета THU следует использовать наибольшие из стандартных отклонений по оси X (σ_x) или Y (σ_y), но это невозможно, поскольку предполагается их равенство.

⁸ IHO Standards for Hydrographic Surveys, International Hydrographic Organization, Special Publication No 44, 6th Edition 6.2.0, 2024. — 40 p [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ihonet.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.2.0_adopted.pdf.

⁹ Adoption Of Edition 6.2.0 of S-44 — IHO STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS. CIRCULAR LETTER № 21 24 April 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ihonet.int/uploads/user/circular_letters/eng_2025/CL21_2025_EN_v1.pdf.

Руководитель HSWG в своих комментариях ссылается на Учебник по гидрографии МГО¹⁰, который был первоначально опубликован в 2005 г. как документ М-13 МГО и затем в 2011 г. актуализирован с новым номером С-13 МГО. Этот документ содержит семь глав со списком литературы в каждой главе, а также приложения к отдельным главам. Отметим, что все источники в списках литературы изданы ранее 2005 г.

Рассмотрим отдельные положения Учебника по гидрографии МГО, имеющие отношение к вопросам, касающимся комментариев Руководителя HSWG. Гл. 2 Positioning («Позиционирование») Учебника по гидрографии МГО содержит разд. 6 Positioning Methods (Techniques of Positioning), в котором применительно к GPS представлен п. 6.2.1 Accuracy in position determination. В этом пункте приведена следующая формула для расчета величины DRMS (Root Mean square error in the distance):

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{2\sigma^2} = 1,414\sigma.$$

При этом сделано допущение о том, что стандартные отклонения по оси $X(\sigma_x)$ и $Y(\sigma_y)$ равны.

Англоязычный текст, представленный в этом пункте, гласит:

Radial error or root mean square error in the distance (1 σRMS or 1 DRMS): with the assumption of equality of the standard deviations around two dimensions ($\sigma_x \sigma_y$), of orthogonality between the axes x and y , of normal and not correlated distributions of error, the following relationship is valid.

Между тем в Учебнике по гидрографии МГО отсутствует термин для обозначения величины σ и ее определение в Словаре МГО¹¹. Указанное допущение никак не обосновывается и с точки зрения современной обширной практики применения аппаратуры ГНСС является неправомерным. Величины σ_x и σ_y всегда различаются, и применение формулы (2.65), приведенной на с. 99 Учебника по гидрографии МГО, для расчета допустимой величины THU не оптимально. Применение указанной формулы из Учебника по гидрографии МГО для расчета «DRMS» которая в S-44 (2008) и S-44 (2020,2022) называется *Standard Deviations* (без ссылки на метод ее расчета), искажает результаты расчетов априорной неопределенности положения глубин на дне THU по методике, представленной в работе [8].

Автоматизация расчетов априорной неопределенности положения глубин на дне реализована в ЭГИС HYPACK (Программа TPE Calculator), а также в программе AMUST¹². На практике величина DRMS для ГНСС обсервации рассчитывается на основе данных, содержащихся в идентификаторе формата сообщения GST строки идентификатора сообщения протокола NMEA. В сообщении GST содержатся параметры среднеквадратического эллипса погрешностей, величины среднеквадратических погрешностей (стандартных отклонений) по осям x , y (σ_x , σ_y) и высоты σ_z .

При выполнении стояночных наблюдений с аппаратурой ГНСС на репере с известными координатами пользователь также получает σ_x , σ_y , σ_z для обоснования расчетов априорной величины THU. Такие расчеты автоматизированы, например, в программе «C-Monitor Software»¹³, а также в программах калибровки ГНСС аппаратуры, реализованных, например, в ЭГИС QINSy¹⁴.

Далее следует прокомментировать третий пункт комментариев УНиО к проекту издания 6.2.0 публикации S-44, касающегося того, что «... недостаточно проработаны вопросы, связанные с альтернативным методом определения поправок уровня...». В своем ответе Руководитель HSWG считает, что «... этот вопрос должен рассматриваться в публикации МГО С-13, а не в Стандарте S-44». Этот вопрос передан председателю Проектной Группы МНРТ.

Отметим, что в Учебнике по гидрографии МГО С-13 вопросы, связанные с альтернативным методом определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезических высот реперов уровенных постов, рассмотрены в гл. 7 Hydrographic Practice. В разд. 4.2 Vertical Control

¹⁰ Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p.

¹¹ Hydrographic Dictionary [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ihp-ohi.net/S32/> (дата обращения: 10.07.2025)

¹² Work instruction V3.0.0 for AMUST. Version 3.0.0. Rijkswaterstaat, 2018. 61 p.

¹³ Oceaneering. C-Monitor Software. <https://www.oceaneering.com/products/c-monitor-software>.

¹⁴ Quality Positioning Services. Position Fix Option. <https://qpssoftware.scrollhelp.site/qinsy>.

and Calibration на с. 453 указывается, что реализация метода получения поправок уровня в реальном масштабе времени требует определение разности высот между поверхностями нуля глубин (MLLW) и эллипсоида. Такая методика использовалась в начале XXI в., когда имелась неточная модель глобального геоида EGM-96 [9], а региональные модели геоида только начали создаваться. С введением более точной модели глобального геоида EGM-2008[10] появилась возможность использовать взамен эллипсоида разности высот нулей глубин и поверхностей глобального или региональных геоидов. Такие технологии в настоящее время реализованы в большинстве ЭГИС. Так, в ЭГИС HYPACK имеется возможность использовать 16 региональных геоидов¹⁵, а в ЭГИС QINSy — модель глобального геоида EGM-2008¹⁶.

Использование разности высот между поверхностями нуля глубин и моделью геоида имеет преимущество, поскольку будучи зафиксирована на уровне посту остается неизменной на обширной акватории. Описание технологии определения поправок уровня относительно геоидов следует включить в новое издание Учебника по гидрографии МГО С-13, а также более детально отразить в новой редакции Стандарта S-44.

Достигнутые дециметровые точности получения высот моделей геоида, а также возможность определения геодезических высот реперов уровневых постов на основе фазовой двухчастотной аппаратуры ГНСС с использованием технологий PPP / RTK дают в настоящее время технологические возможности широкого применения альтернативного определения поправок уровня и открывают новую эру трехмерной (3D) гидрографии.

В заключение прокомментируем последний (четвертый) пункт комментариев УНиО к проекту издания 6.2.0 публикации S-44, касающегося необходимости использования контрольных поперечных галсов при съемке рельефа. В ответе Руководителя HSWG, хоть и признается важность контрольных галсов как часть процесса обеспечения качества, но утверждается, что «...такие процедурные элементы больше подходят для С-13».

Отметим, что необходимость выполнения контрольных галсов отмечается в четвертой и пятой редакциях Стандарта S-44 как необходимый элемент апостериорного контроля качества, но были упущены во всех трех в версиях шестой редакции издания Стандарта S-44.

В гл. 7 Hydrographic Practice имеется разд. 6 Data Processing, содержащий п. 6.1 Bathymetry (см. с. 473). Текст, касающийся выполнения контрольных галсов и контроля качества, представленный в этом разделе, гласит:

Careful inspection of the crossline/checkline data should be undertaken, a statistical plot should be produced and any differences $> \sqrt{2}x$ sounding error budget should be investigated.

Таким образом, Учебник по гидрографии МГО однозначно регламентирует необходимость выполнения контрольных галсов для контроля качества результатов съемки рельефа дна. В пятой редакции Стандартов S-44 содержались полезные приложения «A» («Guidelines for Quality Control») и «B» («Guidelines for Data Processing»), которые планировалось поместить в Учебник М-13 МГО. К сожалению, эти полезные материалы, содержащие указания по контролю качества, в том числе на основе использования контрольных галсов (см. прил. А, п. А.3.1, А.3.2¹⁷), не были включены в актуализированный Учебник по гидрографии МГО и не нашли отражения в издании 6.2.0 шестой редакции S-44.

В настоящее время для обработки данных площадных съемок используются два пакета гидрографических программ, обеспечивающих автоматизацию контроля качества результатов съемки на основе статистических расчетов при сравнении глубин в зонах пересечения батиметрической модели, созданной на основе системы основных галсов с облаком глубин контрольного галса: CARIS HIPS (Teledyne) и Qimera (QPS). На рис. 2 показано окно гистограммы разностей глубин программы

¹⁵ HYPACK Manual. V.16, HYPACK Inc., 2024. 480 pp.

¹⁶ Quality Positioning Services. How-to Height — Tide and RTK. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://qpssoftware.scrollhelp.site/qinsy/how-to-height-tide-and-rtk>.

¹⁷ IHO Standards for Hydrographic Surveys, International Hydrographic Organization, Special Publication No 44, 5th Edition February 2008. 28 p.

Cross Check пакета Qimera, которая обеспечивает автоматизацию при расчете одного из способов контроля качества результатов съемки.

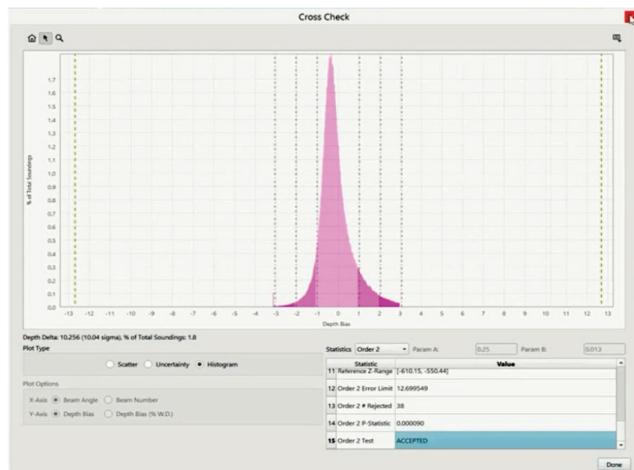


Рис. 2. Окно гистограммы разностей глубин программы «Cross Check» пакета Qimera¹⁸

Результатом работы программы является вычисление THU, допустимой для заданной категории съемки по S-44 для определенного диапазона глубин, а также контроль наличия систематических ошибок. Другим способом контроля качества результатов съемки рельефа дна является *построение модели неопределеностей глубин* (Uncertainty Surface) по всему району съемки. Этот термин впервые появился в пятой редакции S-44¹⁹, но оказался невостребованным в шестой редакции S-44.

В заключение следует отметить, что второй вариант шестой редакции S-44, несомненно, является развитием новой парадигмы современной цифровой гидрографии, однако требует дальнейшей доработки и совершенствования с учетом актуализированного Учебника по гидрографии МГО.

Изложение альтернативной методологии определения поправок уровня на основе использования технологий PPP / RTK и новых региональных моделей геоидов должно стать приоритетным при подготовке нового Учебника по гидрографии МГО и найти свое отражение в деятельности рабочей группы по подготовке последующих редакций Стандартов S-44 МГО в части рекомендаций по внедрению в практику выполнения съемок концепций трехмерной цифровой гидрографии.

Выходы (Summary)

В результате выполненного анализа издания 6.2.0 шестой редакции S-44 можно сделать следующие выводы.

1. Все нововведения издания 6.2.0 шестой редакции S-44 являются актуальными и могут быть приняты для утверждения. УНиО МО РФ согласован проект издания 6.2.0 шестой редакции S-44 и рекомендовано утвердить его в качестве текущего варианта S-44 с учетом ряда предложений.

2. Рабочая группа шестой редакции S-44 дала свои формальные и противоречивые комментарии относительно предложений УНиО, фактически отказавшись от их рассмотрения.

3. В проекте издания 6.2.0 шестой редакции S-44 п. 2.7 предлагалось для расчета местоположения с 95 %-м уровнем доверительной вероятности для двумерных величин в виде THU использовать не «наибольшую величину стандартного отклонения по осям x или y », а «среднее значение стандартных отклонений по осям x или y в соответствии с формулой (1)». Рабочая группа шестой

¹⁸ Quality Positioning Services. Qimera 2.5 Documentation. chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgkclefindmka/j/https://publicdownload.qps.nl/Qimera/Qimera-2.5.4-Documentation.pdf

¹⁹ IHO Standards for Hydrographic Surveys, International Hydrographic Organization, Special Publication No 44, 5th Edition February 2008. 28 p.

редакции S-44 сообщила, что понимает проблему, но пока оставляет рекомендацию по расчету допустимой ТНУ без изменений.

4. В шестой редакции S-44 остаются недостаточно проработанными вопросы, связанные с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезической высот реперов уровенных постов и нулей глубин с использованием прецизионных ГНСС-обсерваций в геоцентрической системе координат, известных в специальной зарубежной литературе как RTK-tide.

5. В проекте издания 6.2.0 шестой редакции S-44 для апостериорной оценки качества результатов батиметрической съемки по-прежнему предлагается использовать только тестовый полигон. Необходимость контроля результатов постобработки съемки рельефа с применением анализа на основе статистического сравнения глубин основных и контрольных галсов применительно к данной категории съемки в шестой редакции S-44 вообще не упоминается. Этот очевидный недостаток шестой редакции Стандартов S-44 МГО, по нашему мнению, необходимо исправить при подготовке проекта очередной седьмой редакции.

6. Учебник по гидрографии МГО С-13 (2011), по мнению рабочей группы, является основой для подготовки новых редакций Стандартов S-44. Однако текст этого учебника, впервые изданного в 2005 г. и частично отредактированного в 2011 г., в настоящее время во многом устарел и требует актуализации.

Кроме того, рекомендуется до начала подготовки проекта седьмой редакции Стандартов S-44 МГО выполнить актуализацию Учебника по гидрографии МГО С-13 в части внесения в гл. 1 основных положений шестой редакции Стандартов S-44 МГО, уточненной оценки точности планового положения для расчета суммарной горизонтальной неопределенности, оценки апостериорной точности результатов батиметрической съемки, а также детального изложения технологии альтернативного метода определения поправок уровня на основе использования технологий PPP / RTK.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wells D. E. IHO S-44 Standards for Hydrographic Surveys and the Variety of Requirements for Bathymetric Data/D. E. Wells, D. Monahan / D. E. Wells // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2001. — Is. 60. — Pp. 31–39.
2. Фирсов Ю. Г. К вопросу о нормативных документах для выполнения гидрографических работ / Ю. Г. Фирсов // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 97–107. — EDN NCTIGB.
3. Фирсов Ю. Г. Пятая редакция Международного стандарта на гидрографические съемки S-44 Международной гидрографической организации / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 1(51). — С. 39–44. — EDN IIWENT.
4. Гарматенко И. С. Международные стандарты оценки точности навигационной информации / И. С. Гарматенко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2013. — Т. 6. — № 8. — С. 863–866. — EDN RVSEGХ.
5. Зубченко Э. С. Новая редакция Стандарта S-44 Международной гидрографической организации / Э. С. Зубченко // Записки по гидрографии. — 2021. — № 312. — С. 38–64.
6. Фирсов Ю. Г. Современная цифровая гидрография и требования новых международных стандартов для батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-1-6-1-17-36. — EDN NFUHRU.
7. Фирсов Ю. Г. Рекомендации по проекту издания 6.2.0 шестой редакции стандартов-44 Гидрографической съемки Международной Гидрографической организации / Ю. Г. Фирсов // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября — 20 октября 2024 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 172–180. — EDN YDVLPI.
8. Hare R. Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding / R. Hare // The International Hydrographic Review. — 2015. — Vol. 72. — Is. 2. — Pp. 37–69.

9. Fell P. Comparison of national vertical and chart datums with WGS 84 (EGM96) geoid / P. Fell, M. Tanembaum // OCEANS '02 MTS/IEEE — 2 2002. — C. 1121–1126. vol. 2. — DOI: 10.1109/OCEANS.2002.1192123.

10. Pavlis N. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. Factor // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2012. — Vol. 117. — Is. B4. DOI: 10.1029/2011JB008916.

REFERENCES

1. Wells, D. E. "IHO S-44 Standards for Hydrographic Surveys and the Variety of Requirements for Bathymetric Data/D. E Wells, D. Monahan." *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 60 (2001): 31–39.
2. Firsov, Yu. G. "Navigation and hydrography." *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 97–107.
3. Firsov, Yu. G. "5th edition of the international standard for hydrographic mapping S-44 of the international hydrographic organization (based on the materials from foreign sources)." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(51) (2008): 39–44.
4. Garmatenko, I. S. "International standards of the assessment of accuracy of navigation information." *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies* 6.8 (2013): 863–866.
5. Zubchenko, E. S. "Novaya redaktsiya Standarta S-44 Mezhdunarodnoy gidrograficheskoy organizatsii." *Zapiski po gidrografii* .312 (2021): 38–64.
6. Firsov, Yu. G. "Modern digital hydrography and the new international hydrographic organisation bathymetric survey standards." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.
7. Firsov, Yu. G. "The recommendations on update 6.2.0 of the 6th edition of international hydrographic organization hydrographic surveys standards." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorskogo-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova": Sbornik statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 30 sentyabrya — 20 oktyabrya 2024 goda.* Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 172–180.
8. Hare, R. "Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding." *The International Hydrographic Review* 72.2 (2015): 37–69.
9. Fell, P. and M. Tanembaum. "Comparison of national vertical and chart datums with WGS 84 (EGM96) geoid." *OCEANS '02 MTS/IEEE — 22002: 1121–1126 vol.2.* DOI: 10.1109/OCEANS.2002.1192123.
10. Pavlis, N. K., S. A. Holmes, S. C. Kenyon and J. K. Factor. "The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117.B4 (2012). DOI: 10.1029/2011JB008916.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov, Yury G. —
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: *gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2025 г.

Received: September 11, 2025.

MODEL OF THE LIFE CYCLE OF AN AUTOMATED TUGBOAT IN THE SYSTEM OF AUTONOMOUS SHIP GUIDING AND MOORING IN A SEAPORT

Ya. V. Burylin¹, S. S. Zhuk¹, A. A. Butsanets^{2,3}

¹ Admiral Ushakov Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

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

³ Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

This paper presents a conceptual life cycle model of an automated tugboat (AT) operating within a system that provides autonomous ship guiding and mooring in a seaport. Existing approaches to modeling the life cycle of technical systems are analyzed, with particular attention to the specific features of autonomous maritime vessels. Special emphasis is placed on the operational phase, which fundamentally differs from that of conventional tugboats due to the absence of an onboard crew and fully automated operation. Six core systems ensuring AT functionality are identified: the automatic navigation system, situational awareness system, technical systems control and monitoring system, communication system, propulsion system, power supply system, and rigid coupling systems designed for connection with both transport vessels and other automated tugboats. Five main measures for ensuring failure-free operation are defined: preventive maintenance, operability monitoring, functional testing, predictive maintenance, and corrective maintenance. Based on an analysis of six possible operational states of ATs—readiness, active operation, standby, emergency, recovery, and charging—the study establishes dependencies between these states and permissible maintenance activities. A generalized conceptual life cycle model of the automated tugboat is proposed, aimed at improving reliability and safety during autonomous port operations. The results can be applied in the design, operation, and certification of autonomous tugboats and may support the development of standards and regulations for autonomous maritime systems.

Keywords: automated tugboat, autonomous guiding support, autonomous mooring support, life cycle, operation, maintenance, automatic navigation system, situational awareness system, reliability, modeling, autonomous navigation.

For citation:

Burylin, Yaroslav V., S. S. Zhuk and A. A. Butsanets. "Model of the life cycle of an automated tugboat in the system of autonomous ship guiding and mooring in a seaport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 717–727. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-717-727.

УДК 656.61.052

МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА БУКСИРА-АВТОМАТА В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ПРОВОДКИ И ШВАРТОВКИ СУДОВ В МОРСКОМ ПОРТУ

Я. В. Бурылин¹, С. С. Жук¹, А. А. Бусанет²

¹ Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова,
Новороссийск, Российская Федерация

² ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, Российский морской регистр судоходства

В статье представлена концептуальная модель жизненного цикла буксира-автомата в системе обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морском порту. Выполнен анализ существующих подходов к моделированию жизненного цикла технических систем, при этом внимание акцентировано на специфике автономных морских средств. Особое внимание уделено эксплуатационному этапу жизненного цикла, отличающемуся от традиционных буксиров отсутствием экипажа и функционированием в автоматическом режиме. Рассмотрены семь ключевых систем буксира-автомата, обеспечивающих его работоспособность: автоматическая навигационная система, система ситуационной осведомленности,

система контроля и управления техническими средствами, система связи, пропульсивная система, система энергообеспечения, а также системы жесткой сцепки с транспортным судном и другими буксирами-автоматами. Определены пять основных мероприятий по обеспечению безотказной эксплуатации: профилактика, контроль работоспособности, функциональное тестирование, прогнозирующее и корректирующее техническое обслуживание. На основе анализа шести возможных состояний буксиров-автоматов (готовность, рабочее, простой, аварийное, восстановление, зарядка) установлены зависимости между состояниями и допустимыми мероприятиями технического обслуживания. Предложена обобщенная концептуальная модель жизненного цикла буксира-автомата, ориентированная на повышение надежности и безопасности автономных операций в портовой зоне. Отмечается, что результаты исследования могут быть использованы при проектировании, эксплуатации и сертификации автономных буксиров, а также при разработке стандартов и регламентов для систем автономного судоходства.

Ключевые слова: буксир-автомат, обеспечение автономной проводки, обеспечение автономной швартовки, жизненный цикл, эксплуатация, техническое обслуживание, автоматическая навигационная система, система ситуационной осведомленности, безотказная работа, моделирование, автономное судоходство.

Для цитирования:

Бурылин Я. В. Модель жизненного цикла буксира-автомата в системе обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морском порту / Я. В. Бурылин, С. С. Жук, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 717–727. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-717-727. — EDN LLIQKU.

Введение (Introduction)

Развитие технологий автономного судоходства обуславливает необходимость создания новых подходов к проектированию, эксплуатации и обслуживанию автоматизированных судов, включая буксиры-автоматы (БА). Актуальной задачей является разработка комплексной модели жизненного цикла таких судов, учитывающей их специфику и особенности функционирования в составе системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морских портах.

Жизненный цикл (ЖЦ) технической системы представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов изменения ее состояния от проектирования до вывода из эксплуатации. Для БА особенно важным является этап эксплуатации, требующий специального подхода к обеспечению надежности и безопасности функционирования в автоматическом режиме.

Существуют различные определения термина «жизненный цикл» [1], а модель полного ЖЦ отдельного объекта представляет собой описание последовательности всех этапов его существования от замысла и появления («рождения») до исчезновения («отмирания»). При этом большинство определений модели полного ЖЦ имеют два общих свойства:

1) структура (состав этапов) модели ЖЦ не зависит от того, какой объект описывается, т. е. модель ЖЦ инвариантна по отношению к изменению типа объекта, отрасли и т. д., что делает ее универсальной и широко применимой;

2) в жизни в любой момент времени реально существует только процесс деятельности конкретных агентов, направленный на создание конкретных результатов и этот исходный первичный реальный процесс полностью описан потоками моделей ЖЦ.

Остальные типы моделей являются вторичным описанием удобных для решения задач искусственно сконструированных надстроек над реальным процессом [2].

Целью исследования является разработка концептуальной модели жизненного цикла БА и схемы его технического обслуживания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В классическом понимании ЖЦ системы — это набор стадий процессов, которые описывают с заданной ранее подробностью различные состояния системы, начиная с момента ее проектирования, материальной реализации и заканчивая полным выводом из эксплуатации или утилизации.

Типовые модели ЖЦ описаны в отраслевых стандартах^{1,2,3}. На основе результатов анализа этих документов выполнена группировка моделей жизненного цикла и их стадий по признакам характерных для них явлений, процессов (работ) или запланированных конечных результатов, т. е. по *объектному принципу*, и выделены следующие направления:

- ЖЦ технических систем (устройств, компонентов) в целом;
- ЖЦ программного обеспечения (средств) и информационных технологий;
- ЖЦ применяемых технологий;
- ЖЦ автоматических (автоматизированных) комплексов и систем;
- ЖЦ управления стоимостью;
- ЖЦ при взаимодействии с внешней природной или природно-технической средой и др.

В разд. 33 Правил классификации и постройки морских судов⁴ даны следующие определения: «*Жизненный цикл — совокупность взаимосвязанных процессов изменения состояния объекта при его проектировании, создании, эксплуатации, ремонте и утилизации*» и в п. 33.8.3: «*Этапы жизненного цикла — не предполагают в качестве обязательного требования использования единой методологии жизненного цикла автономного судна, а предполагают, что разработчик такого судна самостоятельно выбирает совокупность правил, принципов, идей, понятий, методов и средств, определяющих способ разработки, создания и применения, стадий / этапов жизненного цикла, процессов взаимодействия заинтересованных сторон и т. д.*».

В обобщенном виде стадии и процессы жизненного цикла включают: маркетинговые исследования, выполнение научно-исследовательских работ, опытно-конструкторские работы и проектирование; проведение испытаний; проектирование, планирование и технологическую проработку процессов изготовления продукции; материально-техническое снабжение; закупку материалов и комплектующих изделий; подготовку к производству; производство (изготовление) конечного продукта; испытания и приемку конечного продукта; продажу конечного продукта; монтаж, наладку и подготовку к эксплуатации конечного продукта; эксплуатацию конечного продукта, техническое обслуживание и ремонт; планирование материально-технического (ресурсного) снабжения (обеспечения) при эксплуатации; капитальный или восстановительный ремонт, модернизацию; подготовку к продаже или передаче; утилизацию или переработку. При этом следует уточнить, что стадии жизненного цикла могут относиться как к материальным объектам БА, так и к применяемым информационным технологиям.

Формализация этапов ЖЦ в большинстве случаев осуществляется по временным признакам или контрольным точкам, предусматривающим достижение каких-либо проектных результатов или характеристик процесса. Согласно п. 9 «Технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта», утв. Постановлением Правительства РФ от 12 августа 2010 г. № 623 «*Жизненный цикл судна (судового технического средства) — это совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния судна (судового технического средства) от формирования исходных требований к нему до окончания его эксплуатации или применения*».

В научной литературе ЖЦ БА рассматривается фрагментарно. Например, в работе [3] предложена новая структура управления рисками жизненного цикла, где судно рассматривается как интегрированная сложная система, которая может меняться на протяжении всего своего жизненного цикла. Основное внимание уделяется повышению адаптивной способности системы реагировать на меняющуюся динамику и справляться с неизвестными и возникающими угрозами безопасности. Кроме того, во избежание потенциального смещения проблем между этапами жизненного

¹ ГОСТ Р 57193–2016. — С. 5; ГОСТ Р 57098–2016/ 150/IECTR 24774:2010. Системная и программная инженерия. Управление жизненным циклом: Руководство для описания процесса. М., 2016. 19 с.

² Берг Д. Б. Модели жизненного цикла: учеб. пособие / Д. Б. Берг, Е. А. Ульянова, П. В. Добряк. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 74 с.

³ ГОСТ Р 53791–2023. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. М., 2023.

⁴ Правила классификации и постройки морских судов (ч. XVII) от 01.07.2024 НД № 2–020101–174. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2024. 400 с.

цикла, рассматриваются взаимодействия между факторами риска и его распространением. В этом контексте предлагается изменить систему обеспечения безопасности навигации на *адаптируемую к динамической среде* для реагирования на возникающие угрозы.

В работе [4] рассмотрена применимость 29 методов анализа опасностей для автономных судов, включая требования к безопасности систем и критерии оценки, основанные на характеристиках автономных судов, установленные с использованием подхода системной инженерии. Сделан вывод о том, что традиционные методы анализа опасностей, основанные на цепочке непосредственно связанных событий отказа или отказов компонентов, не могут обеспечить адекватную защиту автономных судов. Авторы работы [4] предлагают на этапе эксплуатации использовать системно-теоретический анализ процессов, который определяет различные критерии оценки технического состояния и работоспособности.

DNV GL предлагает использовать цифрового двойника, т. е. цифровое представление ключевых элементов автономного судна, в качестве ключевого инструмента для имитационного тестирования [5–7]. Цифровой двойник содержит комплексные математические модели судна и его оборудования, включая все датчики и исполнительные механизмы. Полная имитационная тестовая система, дополняющая цифрового двойника, должна состоять из виртуального мира для моделирования условий окружающей среды, географической информации и взаимодействия с другим морским трафиком. Наконец, тестовая система должна включать систему управления тестированием, которая контролирует моделирование цифрового двойника и виртуального мира, генерирует тестовые сценарии, а также оценивает результаты тестовых сценариев. Автоматический инструмент генерации сценариев должен искать низкую производительность и в конечном итоге устанавливать достаточный охват возможного пространства сценариев. Оценка тестового сценария должна автоматически учитывать безопасность, соответствие МППСС-72 и, возможно, также эффективность маршрута судна.

В работе [8] рассматривается проблема анализа данных автоматической идентификационной системы (АИС) с целью выделения типовых ситуаций встречи судов в море и выявления действий судоводителей по расхождению в таких ситуациях. Эта проблема является актуальной в связи с необходимостью наличия собственной базы эталонных действий для тестирования систем автономного судовождения (САС), интерес к разработке которых возрастает в связи с созданием морских автономных надводных судов (МАНС).

Таким образом, в большинстве источников научной литературы описано решение частных задач функционирования судна, его взаимодействия с другими судами или их системы управления [5–10]. В общем виде модель функционирования БА на этапе эксплуатации жизненного цикла представляет собой сравнительно малое скопление судов, управляемых из единого центра. В такой парадигме каждый БА является элементом системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов (СОАПШ). В этом случае СОАПШ является системой верхнего уровня для рассматриваемых в данной работе объектов исследования. Задача по разработке модели жизненного цикла БА инвариантна в СОАПШ судов в морском порту, поскольку эксплуатационный период жизненного цикла является типовым.

В процессе рассмотрения различных моделей жизненного цикла применительно к БА и сравнения их традиционными буксирами, было выявлено, что большинство стадий и процессов не имеет существенных отличий за исключением этапа эксплуатации. При этом главным различием является отсутствие экипажа на борту БА и его работа в автоматическом или полуавтоматическом режиме. На рис. 1 в графическом виде представлены этапы жизненного цикла БА.

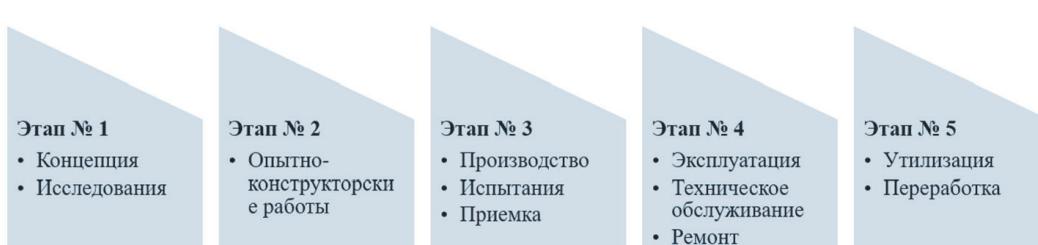


Рис. 1. Основные этапы жизненного цикла БА

В то же время каждый БА является *метасистемой* для систем, обеспечивающих его безотказную эксплуатацию. Представляется, что каждый БА обладает типовыми характеристиками, свойствами и состояниями во время эксплуатационного жизненного цикла (рис. 2).



Рис. 2. Метасистема СОАПШ в синтезе с БА

Таким образом, целесообразно начать построение модели с определения мероприятий, направленных на безотказную работу БА и типовых состояний на этапе эксплуатации жизненного цикла, основными из которых являются профилактика, контроль работоспособности, функциональное тестирование, прогнозирующее техническое обслуживание, корректирующее техническое обслуживание.

Затем необходимо выделить основные системы, обеспечивающие функционирование БА:

1. Автоматическая навигационная система (АНС).
2. Система ситуационной осведомленности (ССО).
3. Система контроля и управления техническими средствами (СКУТС).
4. Система связи.
5. Пропульсивная система (ВРК).
6. Система энергообеспечения.
7. Система жесткой сцепки к транспортному судну и к месту стоянки.
8. Система жесткой сцепки с другим БА.

Синтез основных мероприятий, обеспечивающих безотказную работу БА и его систем, позволил составить *обобщенную модель жизненного цикла*. С учетом проанализированных стандартов составлена таблица, в которой сформулированы мероприятия, направленные на обеспечение безотказной эксплуатации, с описанием выполняемых действий.

Согласно рассмотренным в работе [5] графикам состояния БА СОАПШ, на этапе эксплуатации жизненного цикла были проанализированы функциональные свойства основных систем, отвечающих за его функционирование. Затем была выполнена декомпозиция основных систем БА, к которым необходимо применить мероприятия для обеспечения их безотказной эксплуатации по шести состояниям. В результате была получена следующая таблица, в которой отображена возможность выполнения одной из мер обеспечения безотказной эксплуатации систем в заданный момент состояния БА.

Обеспечительные мероприятия безотказной эксплуатации

№ п/п.	Название	Выполняемые действия
1	Профилактика (работы выполняются персоналом или в автоматизированном режиме)	Визуальный осмотр в соответствии с установленным планом; инструментальная диагностика в соответствии с установленным планом; фиксация результатов в электронном журнале; выдача рекомендаций по дополнительной диагностике; выдача рекомендаций по техническому обслуживанию.
2	Контроль работоспособности	Автоматическая проверка работоспособности системы, всех ее функций по принципу обязательного отклика («работает» — «не работает»); фиксация результатов в электронном журнале; выдача рекомендаций по настройке или обновлению программного обеспечения.

Окончание таблицы

3	Функциональное тестирование	Решение тестовых задач; сравнение решений тестовых задач и эталонных решений; предварительное тестирование «новых кейсов», или новых технологических схем; машинное обучение интеллектуальных систем (при их наличии); фиксация результатов в электронном журнале; выдача рекомендаций по техническому обслуживанию; выдача рекомендаций по настройке или обновлению программного обеспечения.
4	Прогнозирующее техническое обслуживание	Плановое техническое обслуживание, плановый ремонт
5	Корректирующее техническое обслуживание	Внеплановое техническое обслуживание, внеплановый ремонт

В процессе заполнения таблицы была проанализирована возможность профилактики для АНС БА. При этом учитывалось, что в состоянии *готовности* к эксплуатации кратковременная профилактика возможна, если она не создает препятствий для перехода в *рабочее состояние*. Например, визуальный осмотр или дистанционная инструментальная диагностика, которые могут быть остановлены в любой момент времени без ущерба для систем и позволяют выполнить моментальный переход в рабочий режим. При этом в *рабочем состоянии* БА меры обеспечения безотказной эксплуатации не могут быть применены для АНС БА, поскольку БА участвует в операции сопровождения транспортного судна, а его системы функционируют и самодиагностируются (например, в случае кратковременной невозможности местоопределения ошибка вносится в электронный журнал).

В режиме *простой*, когда СОАПШ не может проводить операции сопровождения транспортных судов вследствие административного запрета, погодных условий или иных ограничений на проведение подобных операций в акватории порта, процессы удержания судов у причалов продолжаются, и имеется возможность проведения таких мероприятий, как профилактика, контроль работоспособности и функциональное тестирование. В *аварийном состоянии* эксплуатационного этапа жизненного цикла, когда СОАПШ не может обеспечивать полную функциональность БА вследствие выхода из строя или некорректной работы ее компонентов, возможны все виды обеспечительных мер в случае, если авария не связана с выходом из строя непосредственно БА. В случаях, когда переход в аварийное состояние произошел по вине БА, профилактические проверки проводить нецелесообразно и следует переходить к корректирующему техническому обслуживанию. Данное состояние граничит с *состоянием восстановления*. В этом состоянии БА должно быть предусмотрено применение любых обеспечительных мер в необходимой последовательности. Состояние *зарядки* эксплуатационного этапа жизненного цикла не может сопровождаться мероприятиями для обеспечения безотказной эксплуатации.

Результаты и их обсуждение (Results)

Предложена концептуальная модель жизненного цикла БА, учитывающая специфику его функционирования в системе обеспечения автономной проводки и швартовки судов (рис. 3).

В схеме технического обслуживания БА, приведенной на рис. 4, выделены основные системы БА, требующие постоянного контроля и обслуживания, а именно: автоматическая навигационная система (АНС), система ситуационной осведомленности (ССО), система контроля и управления техническими средствами (СКУТС) и др. Определены ключевые мероприятия по обеспечению безотказной эксплуатации БА: профилактика, контроль работоспособности, функциональное тестирование, прогнозирующее и корректирующее техническое обслуживание. Установлены зависимости между состояниями БА и возможностью выполнения обеспечительных мероприятий, что позволяет оптимизировать процесс технического обслуживания. Предложена схема взаимодействия компонентов системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов, включающая центр дистанционного управления и пункт технического обслуживания.

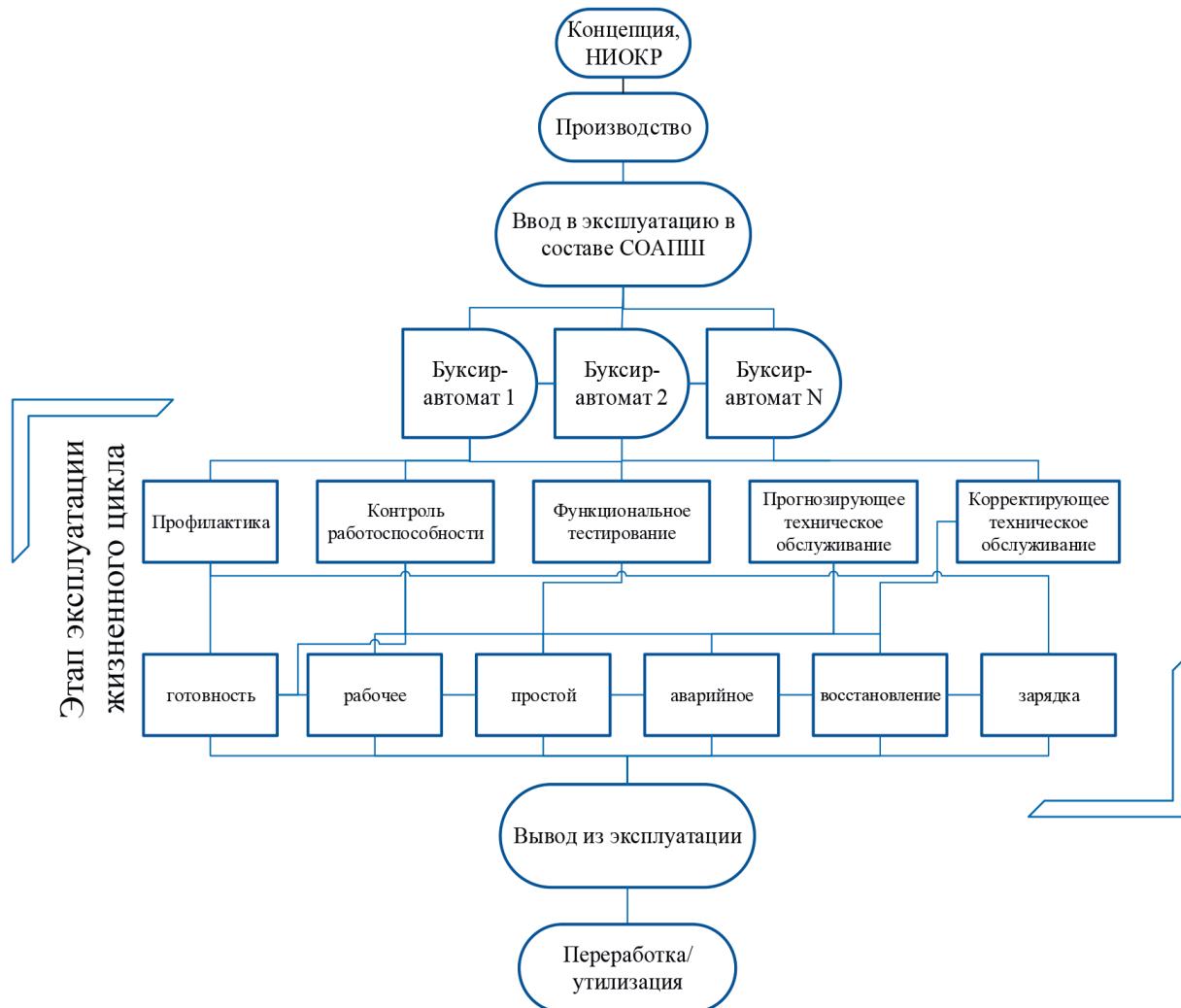


Рис. 3. Концептуальная модель жизненного цикла БА

Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование методов диагностики и прогнозирования технического состояния БА, а также на развитие методов искусственного интеллекта для автоматизации процессов технического обслуживания. Разработанная и представленная на рис. 3 концептуальная модель жизненного цикла учитывает рассмотренные в других разделах исследования системы БА, а также принципиальную схему взаимодействия БА с ЦДУ и сервисной службой, которая выполняет техническое обслуживание систем и устройств БА, а также ремонты, проведение которых возможно на месте стоянки БА.

В рамках сформированной концепции модели жизненного цикла предполагается, что системы БА с заданной дискретностью будут передавать первичные сигналы измерительной информации в систему контроля и управления ТС (СКУТС). Затем преобразованные в СКУТС сигналы с помощью системы связи передаются в центр дистанционного управления (ЦДУ). Часть этих данных может быть записана в судовой, машинный или другие журналы (при наличии требований их ведения).

В ЦДУ (см. рис. 4) осуществляется отображение текущего состояния бортовых систем БА, а также хранение информации и ее постобработка для решения задач диагностики, прогнозирования отказов, планирования внеочередного техобслуживания в целях предупреждения аварийных отказов и обеспечения заданного уровня безопасности судоходства. Необходимое сопоставление однотипных БА между собой позволит кратно увеличить объем информации и получать достоверную информацию о техническом состоянии систем БА за меньший промежуток времени.

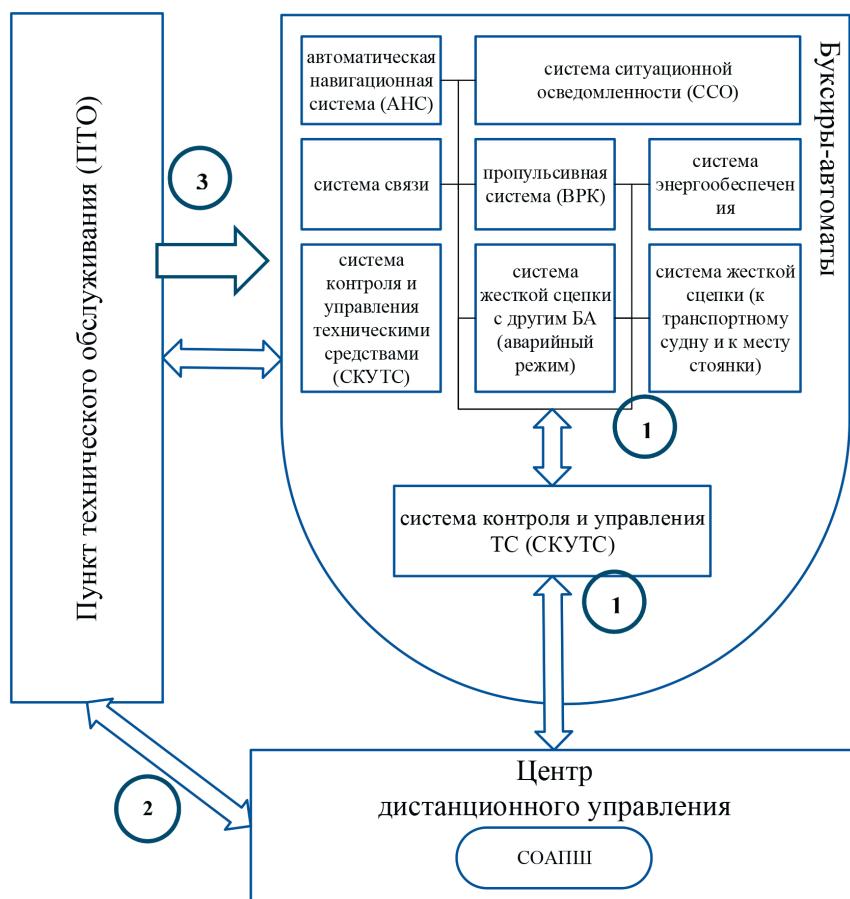


Рис. 4. Схема технического обслуживания БА в СОАПШ:
1 — системы БА — СКУТС БА — информация о состоянии;
СКУТС БА — системы БА — команды на тестирование и эксплуатацию;
СКУТС БА — ЦДУ — информация о состоянии БА;
ЦДУ — СКУТС БА — команды на тестирование и эксплуатацию;
2 — ЦДУ — ПТУ — задания на техническое обслуживание БА;
ПТУ — ЦДУ — отчеты о техническом обслуживании БА;
3 — ПТУ — БА — техническое обслуживание и ремонт БА

В случае выявления ЦДУ потребности в техобслуживании (как в автоматизированном режиме, так и оператором) соответствующая команда с описанием ситуации и задач направляется в пункт технического обслуживания (ПТО), где подготовленный персонал выполняет необходимые работы.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная концептуальная модель жизненного цикла БА формирует системный подход к решению задачи по обеспечению безопасности судоходства в условиях автономной работы [11–14] в акватории порта.
2. Учет специфики отсутствия экипажа, интеграции с портовой инфраструктурой и взаимодействия в составе метасистемы СОАПШ делает модель применимой при предпроектном проектировании для прогнозирования возможности эксплуатации современных автономных технических средств.
3. Установленные зависимости между состояниями БА и возможными мероприятиями технического обслуживания позволяют оптимизировать процессы диагностики, ремонта и профилактики, минимизируя простоя и повышая общую надежность системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лещинский А. П.* Полный жизненный цикл корабля. Ресурсно-процессный подход / А. П. Лещинский // Вооружение и экономика. — 2020. — № 3(53). — С. 38–42. — EDN YLAAUF.
2. *Заслонов В. В.* Проблема группового расхождения автономных судов в акватории порта / В. В. Заслонов, А. А. Головина // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 3–1(65). — С. 269–277. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.050. — EDN GSTZAP.
3. *Епихин А. И.* Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А. И. Епихин, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 3–1(53). — С. 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010. — EDN IKWJXK.
4. *Биденко С. И.* О концептуальном облике буксира-автомата для работы в буксирном ордере или «стae» / С. И. Биденко, В. Г. Сенченко, А. Б. Васильев // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2021. — № 1–1. DOI: 10.52899/978-5-88303-611-7_170. — EDN MQZWRV.
5. *Смоленцев С. В.* Структурный анализ системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов через графы состояний / С. В. Смоленцев, А. В. Брыляков, В. Г. Сенченко, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 4–13. — EDN CQXSLE.
6. *Таровик О. В.* Обзор развития теории проектирования судов и обсуждение перспектив создания цифровых проектных решений / О. В. Таровик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 124–136. — EDN PELJHW.
7. *Таровик О. В.* Концепция и программная реализация цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования / О. В. Таровик, А. В. Косоротов, М. О. Матаруев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 137–155.
8. *Заслонов В. В.* Автоматическая идентификация и распределение ресурсов буксирного обеспечения при автономной проводке и швартовке транспортных судов / В. В. Заслонов, С. С. Жук // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 1–1(67). — С. 105–116. DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.013. — EDN KQVYUO.
9. *Айзинов С. Д.* Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С. Д. Айзинов, А. А. Буцанец, С. В. Смоленцев [и др.] // Научно–технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83–96. — EDN HNHFAA.
10. *Burylin I. V.* Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes / I. V. Burylin // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2061. — Is. 1. — Pp. 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012074. — EDN FWSZAF.
11. *Karetnikov V.* Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area / V. Karetnikov, E. B., A. I. A. Ol'khovik // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020 — Springer Nature Singapore, 2021. — С. 40–46. — EDN PHCRQD.
12. *Каретников В. В.* К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15. — EDN KFIHYI.
13. *Karetnikov V.* Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator / V. Karetnikov, E. B., A. I., A. Ol'Khovik // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020 — Springer Nature Singapore, 2021. — С. 146–156. — EDN JJVLQH.
14. *Заслонов В. В.* Разработка основных требований к системам функционирования буксира-автомата для проводки морского автономного надводного судна / В. В. Заслонов, С. С. Жук, Е. О. Ольховик // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 502–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-502-514. — EDN EYXMDP.

REFERENCES

1. Leschinskiy, A. P. “The overall ship life cycle. resource-process approach.” *Vooruzhenie i ekonomika* 3(53) (2020): 38–42.

2. Zaslonov, V. V. and A. A. Golovina. "The problem of group divergence of autonomous vessels in the port waters." *Marine intellectual Technologies* 3–1(65) (2024): 269–277. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.050.
3. Epikhin, A. I. and M. A. Modina. "Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses." *Marine intellectual Technologies* 3–1(53) (2021): 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010.
4. Bidenko, S. I., V. G. Senchenko and A. B. Vasil'ev. "About the conceptual appearance of the automatic tow for work in a towing order or ‘pack’." *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta* 1–1 (2021): 1–1. DOI: 10.52899/978-5-88303-611-7_170.
5. Smolentsev, S. V., A. V. Brylyakov, V. G. Senchenko and A. A. Butsanets. "Structural analysis of the system of autonomous ship navigation and mooring through state graphs." *Research Bulletin By Russian Maritime Register of Shipping* 79 (2025): 4–13.
6. Tarovik, O. V. "Review of the evolution of ship design theory and discussion of the prospects of digital design solutions." *Research Bulletin By Russian Maritime Register of Shipping* 79 (2025): 124–136.
7. Tarovik, O. V., A. B. Krest'yantsev, et al. "Concept and software implementation of a digital sibling of a ship at early design stages." *Research Bulletin By Russian Maritime Register of Shipping* .80 (2025): 137–155.
8. Zaslonov, V. V. and S. S. Zhuk. "Automatic identification and allocation of towing resources for autonomous wiring and mooring of transport vessels." *Marine intellectual Technologies* 1–1(67) (2025): 105–116. DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.013.
9. Ayzinov, S. D., A. A. Butsanets et al. "Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping." *Marine intellectual Technologies* 74 (2024): 83–96.
10. Burylin, I. V. "Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes." *Journal of Physics: Conference Series* 2061.1 (2021): 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012074.
11. Karetnikov, V. and E. B., A. I., A. Ol'khovik. "Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020* Springer Nature Singapore, 2021: 40–46.
12. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh and A. A. Butsanets. "On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.
13. Karetnikov, V. and E. B., A. I., A. Ol'Khovik. "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.
14. Zaslonov, V. V., S. S. Zhuk and E. O. Ol'khovik. "Development of main requirements for the operating systems of an automatic tugboat for escorting a maritime autonomous surface ship." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 502–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-502-514.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурылин Ярослав Васильевич —
научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Автоматизация судовождения»
«Государственный морской университет
имени адм. Ф. Ф. Ушакова»
353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,
проспект Ленина, 93.
e-mail: y.burylin@gmail.com

Сергей Сергеевич Жук —
мл. научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Автоматизация судовождения»
«Государственный морской университет имени
адм. Ф. Ф. Ушакова»,
353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,
проспект Ленина, 93.
e-mail: serzh.zhuk.99@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yaroslav V. Burylin —
researcher of the research laboratory
“Automation of Navigation”
Admiral Ushakov State
Maritime University
93, Lenin’s avenue, Novorossisk, 353924,
Russian Federation
e-mail: y.burylin@gmail.com

Sergei S. Zhuk —
researcher of the research laboratory
“Automation of Navigation”
Admiral Ushakov State
Maritime University
93, Lenin’s avenue, Novorossisk, 353924,
Russian Federation
e-mail: serzh.zhuk.99@mail.ru

Буцанец Артем Александрович —
кандидат технических наук,
начальник отдела НТИ и ИС
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
Ответственный редактор научно-технического
сборника РС «Управление
научно-исследовательской деятельности
и инжиниринга»
Федеральное автономное учреждение
«Российский морской регистр судоходства»
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Миллионная, д. 7, литер А
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru,
butsanets.aa@rs-class.org

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
Editor-in-chief of the scientific
and technical collection RS
Research and Engineering Department
Russian Maritime Register of Shipping
7-A, Millionnaya str.,
Saint-Petersburg,
Russian Federation, 191186
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru,
butsanets.aa@rs-class.org

Статья поступила в редакцию: 10 сентября 2025 г.

Received: Sep. 10, 2025.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-728-737

EDN ODYKHD

THE CHOICE OF METHODS FOR MANUFACTURING HULL STRUCTURES OF SHIPS FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

М. А. Moskalenko, С. Е. Chernyakhovich, И. В. Tuzyuk

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

This paper discusses the application of polymer composite processing technologies in the manufacture of hull structures of displacement vessels, describes the main components used, and reviews the primary manufacturing methods approved for use by the Russian Maritime Register of Shipping. The selection of a specific method depends on multiple factors, and in certain cases, shipyards are compelled to deviate from the classification society's recommendation to apply the resin infusion method as the main process. Technological procedures employing the contact molding method are analyzed. For the particular case of producing the outer hull plating of a displacement vessel, justification is provided for selecting a method other than the recommended one. With an identical reinforcement scheme, the side plating thickness obtained by the infusion method was, as expected, lower than that produced by contact molding; however, the contact molding method ensured compliance with the design thickness. Applying the infusion method required the addition of extra reinforcement layers, increasing cost, production time, and structural weight. At the same time, tensile strength and stiffness characteristics of the infusion-produced samples exceeded those of the contact-molded ones. The contact molding method proved more cost-effective, primarily due to lower material consumption, the use of less-skilled labor, and the absence of high production risks. It is proposed to adopt the infusion method as a baseline for calculating hull plating thickness, which could serve as one of the approaches to incorporating the manufacturing method into the structural design process. Addressing the challenges in this field will facilitate the industrial implementation of advanced composite manufacturing technologies based on resin infusion.

Keywords: hull structures, polymer composite materials, manufacturing methods, contact molding, resin infusion, reinforcement scheme, hull plating thickness.

For citation:

Moskalenko, Mikhail A., S. E. Chernyakhovich and I. V. Tuzyuk. "The choice of methods for manufacturing hull structures of ships from polymer composite materials." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 728–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-728-737.

УДК 629.123:656.61.052

ВЫБОР МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М. А. Москаленко, С. Е. Черняхович, И. В. Тузук

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия

Рассмотрены вопросы применения технологий переработки полимерных композиционных материалов в корпусные конструкции водоизмещающих судов, дано описание исходных компонентов и рассмотрены основные методы изготовления конструкций, допускаемые к применению Российским морским регистром судоходства. Применение определенного метода зависит от ряда факторов и в некоторых случаях верфям-изготовителям приходится отклонять рекомендацию классификационного общества об использовании преиму-

щественно метода инфузии. Исследованы технологические процессы с применением метода контактного формования. Для частного случая изготовления наружной обшивки водоизмещающего судна дано обоснование выбора метода не в пользу рекомендуемой технологии, так как при одинаковой схеме армирования толщина бортовой обшивки корпуса, изготовленная методом инфузии, оказалась ожидаемо меньше, чем изготовленная методом контактного формования. При этом метод контактного формования обеспечил толщину в соответствии с проектом. Для применения метода инфузии требовалось в схему армирования внести дополнительные слои армирующего материала, увеличивая стоимость, время изготовления и вес конструкции. В то же время прочностные характеристики отобранных образцов обшивки, изготовленной методом инфузии, превысили показатели прочности образцов обшивки, изготовленной методом контактного формования. Метод контактного формования оказался экономически более эффективным в первую очередь за счет применения меньшего объема материалов, привлечения малоквалифицированной рабочей силы и отсутствия риска форс-мажорных обстоятельств. Предлагается принять метод инфузии базовым в расчетах толщины обшивки корпуса, что может служить одним из вариантов использования метода изготовления корпусных конструкций корпуса. Решение задач в этой области позволит беспрепятственно внедрять и применять на производстве более совершенные технологии с использованием метода инфузии.

Ключевые слова: корпусные конструкции, полимерный композиционный материал, методы изготовления, контактное формование, инфузия, схема армирования, толщина обшивки.

Для цитирования:

Москаленко М. А. Выбор методов изготовления корпусных конструкций судов из полимерных композиционных материалов / М. А. Москаленко, С. Е. Черняхович, И. В. Тузук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 728–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-728-737. — EDN ODYKHD.

Введение (Introduction)

В настоящее время в Российской Федерации изготовление конструкций корпусов судов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) регламентировано Правилами классификации и постройки морских судов (Правила РС), ч. XVI «Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов» 2025 г. издания¹. Правила 2018 г. издания² распространялись на водоизмещающие суда длиной 12–30 м. Развитие технологий и применение новых материалов, рассмотренных в работе [1], позволило в современных Правилах РС начиная с 2019 г. распространить требования на корпуса водоизмещающих судов длиной до 70 м включительно. Проектные особенности изготовления корпусов водоизмещающих судов из ПКМ рассмотрены в статье [2].

В современных Правилах РС, изданных на английском языке — Rules for the classification and construction of sea-going ships, part XVI: Structure and strength of fiber-reinforced plastic ships³, полимерные конструкционные материалы (ПКМ) обозначаются как Fiber-Reinforced Plastic (FRP) — армированный волокнами пластик. Следует заметить, что за рубежом аббревиатура FRP — традиционное обозначение армированного волокнами пластика, в том числе стеклопластика — Fiberglass Reinforced Plastic (FRP), также известного как Glass Reinforced Plastic (GRP) — пластик с армирующими волокнами из стекла.

В соответствии с Правилами РС для изготовления корпусов водоизмещающих судов допустимы к применению ПКМ на основе армирующих материалов, полимерной матрицы, состоящей из отверженного полиэфирного, винилэфирного или эпоксидного связующего и в некоторых случаях заполнителей средних слоев в трехслойных или многослойных конструкциях⁴.

В судостроении при строительстве водоизмещающих судов применяют стеклопластик, где в качестве армирующего материала традиционно используется стекловолокно, а в качестве

¹ Правила классификации и постройки морских судов, часть XVI «Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов». Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2025. 168 с.

² Правила классификации и постройки морских судов, часть XVI «Конструкция и прочность корпусов судов и шлюпок из стеклопластика». Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2018. 32 с.

³ Rules for the classification and construction of sea-going ships part XVI: Structure and strength of fiber-reinforced plastic ships. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2025. 160 с.

⁴ Материалы / [Электронный ресурс] // Группа компаний Композит: [сайт]. URL: <https://composite.ru/materialy> (дата обращения: 13.08.2025).

связующего — полиэфирная и винилэфирная смолы. Технологии переработки ПКМ в корпусные конструкции, допускаемые Правилами РС, должны обеспечить получение материала с требуемыми характеристиками, высокое качество изготовления без недопустимых дефектов и возможность применения метода инфузии. В работах [3] и [4] приведены классификация, структура и описание основных технологических процессов формирования конструкций из ПКМ. Применение определенного метода при изготовлении корпусных конструкций зависит от ряда факторов. Иногда верфям-изготовителям приходится отказываться от рекомендации РС преимущественного использования метода инфузии. В обзоре [5] подробно описаны различные виды инфузии, их достоинства и недостатки, а также перспективы применения. Некоторые закономерности, связывающие количество слоев с толщиной и плотностью ПКМ в изготовленной конструкции методом инфузии, рассмотрены в исследовании [6]. В случае невыполнения рекомендации применяется традиционный метод контактного формования.

В целом применение метода инфузии позволяет изготавливать качественные с высокими прочностными характеристиками судовые корпусные конструкции, в первую очередь корпуса судов, наиболее подверженных разрушительному влиянию окружающей среды и механическим повреждениям. Способы оценки технического состояния, информация о построенных и эксплуатационных повреждениях и методах борьбы с ними подробно описаны в работах [7–9].

Предметом настоящего исследования явилось обстоятельство, с учетом которого был определен выбор метода изготовления обшивки корпуса водоизмещающего судна в условиях реального производства. При одинаковой схеме армирования толщина бортовой обшивки, изготовленная методом инфузии, оказалась ожидаемо меньше, чем изготовленная методом контактного формования, в то же время метод контактного формования обеспечил толщину в соответствии с проектом, одобренным РС. Для возможности применения метода инфузии требовалось в схему армирования внести дополнительные слои армирующего материала, что увеличивало стоимость, время изготовления и вес конструкции. В то же время прочностные характеристики отобранных образцов обшивки, изготовленной методом инфузии, превысили показатели прочности образцов обшивки, изготовленной методом контактного формования. Испытание образцов на прочность выполнялись силами лаборатории верфи-изготовителя без учета упругих свойств композита, определение которых в инженерной практике описано в работе [10]. Метод контактного формования оказался экономически более эффективным в первую очередь за счет применения меньшего объема материалов, привлечения малоквалифицированной рабочей силы и отсутствия риска форс-мажорных обстоятельств.

Целью настоящей работы является выявление фактора, препятствующего внедрению и применению наиболее совершенного метода изготовления корпусных конструкций — инфузии. Достижение поставленной цели требует выявления тенденции изменения фактической толщины обшивки в зависимости от применяемого метода изготовления корпусных конструкций при неизменной схеме армирования с соблюдением требований РС к жесткости и прочности материала и конструкций в целом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

ПКМ применяются для изготовления однослойных, трехслойных или многослойных сэндвичевых конструкций, состоящих из наружных несущих слоев и средних слоев заполнителей. Армирующий материал, входящий в состав ПКМ обеспечивает достижение заданных жесткостных и прочностных характеристик. Основные виды армирующих материалов представлены плетеными, мультиаксиальными тканями с разным направлением армирования, матами. Армирующие материалы могут быть из стеклянных волокон для получения стеклопластиков, из углеродных волокон для конструкционных углепластиков и арамидных волокон, применяемых для конструкций судов, испытывающих ударные и вибрационные нагрузки в качестве заполнителя между слоями стекло- или углепластика.

Связующее в составе ПКМ должно обладать требуемыми механическими прочностными и жесткостными характеристиками в отверженном состоянии, высокой адгезией к армирующему материалу и стойкостью к длительному воздействию окружающей среды. Связующим могут быть

полиэфирные, винилэфирные и эпоксидные смолы. Связующие обеспечивают различные свойства создаваемого ПКМ: прочность, устойчивость к среде, свойства для использования в технологии. Для каждого типа связующего применяются свои системы отверждения. Основные компоненты системы отверждения: инициатор (катализатор) и ускоритель (отвердитель), вводятся в связующее для отверждения и получения полимерной матрицы. Гелькоут — наружный слой конструкции судна из ПКМ, является стойким к воздействию окружающей среды высокопрочным декоративно-защитным покрытием.

Заполнители — материалы для сэндвич-структур и заполнителей балок набора, создают объем ПКМ для устойчивости оболочек и жесткости. В качестве заполнителей применяются пенопласти, конструкционные элементы в виде сот, сферопластики, бальза, а также легковесные маты. Кроме материалов и компонентов для создания ПКМ, изготовление корпусных конструкций судна требует наличия технологической оснастки. Основным элементом для изготовления корпусных конструкций судна является матрица — формаобразующая оснастка, повторяющая наружные обводы корпусных конструкций. Основной матрицей, наиболее объемной и материалоемкой, является *матрица корпуса судна*. Применяются как временные матрицы, изготавливаемые из древесины и фанеры, рассчитанные на формовку одной или нескольких конструкций, так и матрицы, изготавливаемые из стеклопластика или металла, рассчитанные на массовую формовку изделий. Для подготовки матриц к формовке конструкций применяют разделительные составы, наносимые на поверхность матриц корпусных конструкций судна для предотвращения адгезии между ПКМ и поверхностью матрицы.

Технологии создания корпусных конструкций из ПКМ допускают применение ряда методов, отличающихся между собой по степени сложности, стоимости, а также используемому оборудованию. В настоящее время, в соответствии с требованиями Правил РС, допускаются к производству и применению на практике следующие методы изготовления корпусных конструкций водоизмещающих судов:

- контактного ручного формования;
- закрытого формования, включающего метод инфузии;
- напыления рубленного волокна.

Допускаемые к применению методы инжекции — одни из методов закрытого формования (метод RTM — Resin Transfer Moulding) и автоклавное формование на основе препрегов — практически не применяются в судостроении.

Наиболее простым с точки зрения технологии, а также самым экономичным в организации является *контактное формование*, используемое для изготовления единичных или небольшого количества корпусных конструкций. Правила РС рекомендуют применять *закрытый метод вакуумной инфузии*, а ручное формование — в местах, где сложно или нецелесообразно использовать метод инфузии (например,стыковка связей набора или соединение конструкций между собой).

Метод инфузии позволяет получать более прочный ПКМ за счет большего содержания армирующего материала. Данный метод позволяет повысить производительность труда и снизить вредное воздействие в производственных помещениях, но его недостаткам можно отнести необходимость в высококвалифицированном персонале, затраты на дорогостоящее оборудование и расходные материалы, повышенные риски потенциальных потерь по сравнению с методом контактного формования.

Метод напыления используется редко при изготовлении корпусных конструкций в судостроении. Правила РС рекомендуют применять этот метод при изготовлении неответственных конструкций, не подверженных нагрузкам и не обеспечивающих жесткость. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость в дорогостоящем оборудовании и применении ручного труда для прокатки нанесенных слоев.

Результаты (Results)

На практике для изготовления корпусов судов применяются методы контактного формования и инфузии. Правила РС рекомендуют при выборе технологии изготовления конструкций учитывать степень отлаженности применения того или иного метода на верфи-изготовителе, наличие опреде-

ленной квалификации персонала и необходимого оборудования. При этом на практике могут возникнуть определенные условия, влияющие на выбор метода изготовления, кажущейся, на первый взгляд, неочевидным.

Рассмотрим изготовление корпуса водоизмещающего судна длиной 25,5 м и шириной 8 м под надзором РС на одной из верфей Китая. Верфью и заказчиком по согласованию с РС принято решение изготовить корпус головного судна методом контактного формования. Изготовлена матрица корпуса, на ее внутреннюю глянцевую поверхность в несколько приемов нанесен разделительный слой. Поверхность матрицы покрывается гелькоутом и после полимеризации покрытия до отлипа начинается поэтапная формовка обшивки корпуса. Процесс формовки заключается в последовательном нанесении слоев армирующего стекломатериала с пропиткой связующим каждого слоя и уплотнением металлическими валиками (рис. 1). Процесс формовки разбит на этапы и подробно описан в *Construction technology instruction book* (Инструкция по технологии строительства, содержащая в том числе схему армирования). Итогом формовки является монолитная «скорлупа, повторяющая обводы корпуса судна с толщиной борта 24 мм и толщиной днища 28 мм.



Рис. 1. Процесс формовки обшивки в матрице методом контактного формования

Контактное (ручное) формование имеет высокую трудоемкость и подразумевает использование имеющей производственный опыт малоквалифицированной рабочей силы. Так как площадь поверхности и толщина обшивки значительны, формовка делится на этапы согласно Инструкции. На примере изготовления бортовой обшивки при формовке корпуса в целом процесс разбивается на семь этапов по количеству затрачиваемых рабочих дней.

Каждый этап дает возможность выполнить запланированные работы в течение одного рабочего дня максимальным количеством формовщиков, рационально распределенных по рабочим зонам в матрице корпуса. Ограниченный объем работ каждого этапа обусловлен не только продолжительностью рабочего дня, но и более существенными причинами, такими как длительное нахождение персонала, выполняющего работы внутри матрицы и подвергающегося несмотря на принудительную вентиляцию рабочих зон и применяемых средств индивидуальной защиты, влиянию вредных испарений, саморазогревание ламинаата при отверждении, возникающее при непрерывной формовке определенного объема, что делает невозможным нанесение последующих слоев и увеличивает интенсивность выделения вредных паров.

В результате изготовления корпуса в соответствии с Инструкции по технологии строительства получена фактическая толщина обшивки борта 24–25 мм при проектной толщине 24 мм. Следует отметить, что отклонение толщины обшивки от проектной в сторону увеличения обусловлено технологическими перекроями стекломатериала в ламинате ПКМ.

При строительстве второго судна этого проекта верфью было предложено изготовление обшивки корпуса *методом инфузии*. Это было связано с сокращением сроков работ в крытом эллинге с целью освобождения производственного помещения для других проектов и ввиду предстоящего на-

ступления холода времени года, непригодного для изготовления объемных конструкций из ПКМ. Необходимо отметить, что на верфях Китая активно применяется метод инфузии для изготовления корпусных конструкций, чему способствует большой выбор на китайском рынке необходимых материалов и оборудования, а также наличие подготовленных квалифицированных специалистов.

Решение о применении метода инфузии должно быть принято по результатам опытной формовки фрагмента обшивки левого борта в районе мидель-шпангоута шириной 2 м и протяженностью от диаметральной плоскости до ширстрека (рис. 2) после согласования с РС соответствия фрагмента обшивки требованиям в первую очередь к размерам толщин.



Рис. 2 Изготовление фрагмента обшивки корпуса судна методом инфузии

Когда фрагмент обшивки был изготовлен, результаты замеров толщины борта показали уменьшение толщины по сравнению с изготовленной методом контактного формования на 2,0–2,5 мм. Это объясняется в первую очередь тем, что при изготовлении обшивки корпуса методом контактного формования по завершении формовки каждого этапа в течение нескольких часов просушки в верхнем слое ламинара формируется слой полимеризовавшегося связующего, дающего дополнительную прибавку к толщине обшивки.

Теоретически при изготовлении обшивки непрерывно до проектной толщины вынужденных увеличений толщины не будет, но изготовление корпуса методом контактного формования в один прием невозможно технологически. Опытным путем определено, что после каждого этапа формовки на поверхности ламинара образуется слой отверженного связующего толщиной 0,2–0,3 мм. Кроме того, уменьшение фактической толщины явилось следствием более плотного ПКМ с увеличенным содержанием армирующего материала и снижения количества пустот в ламинаре, прижатом пленкой под действием вакуума. Физико-механические свойства конструкций возрастают при увеличении объемного содержания армирующего материала в ламинаре, что в наибольшей степени реализует свойства армирующих волокон в готовом ПКМ.

Отобранные из фрагмента обшивки образцы подверглись комплексу физико-механических испытаний в соответствии с программой испытаний по определению свойств прочности при растяжении, изгибе и межслойном сдвиге (рис. 3). Прочностные характеристики образцов, отобранных из фрагмента обшивки, изготовленной методом инфузии, превысили показания прочности образцов обшивки корпуса судна, изготовленной методом контактного формования.

В соответствии с требованиями Правил РС для однослойной наружной обшивки регламентируются тип, марка, способ укладки армирующего материала и технология изготовления из него обшивки с использованием методов контактного формования или инфузии. Это является единственным упоминанием о методах изготовления в требованиях к определению толщины обшивки. Настоящими Правилами РС не лимитируется численное влияние метода изготовления на величину толщины обшивки. В такой ситуации при подтверждении проектантом выбора толщины обшивки

расчетами общей и местной прочности корпуса оптимально принимать в качестве базового метод контактного формования как менее затратный. При этом выбор метода зависит не только от желания заказчика судна сократить расходы, но и от возможностей верфи-изготовителя. Метод контактного формования на верфях-изготовителях постепенно вытесняется методом инфузии, технически более совершенным и более экологичным.



Рис. 3. Процесс проведения физико-механических испытаний в заводской лаборатории

В целях поддержки рекомендаций Правил РС по преимущественному применению метода инфузии авторами работы предлагается внести в Правила РС, в гл. 3.2 «Конструкция корпуса», в пп. 3.2.1.1.7 следующие пояснения:

- определение толщины обшивки в средней части корпуса судна подразумевает применение метода инфузии, устанавливающего нижний предел толщины обшивки, не ограничивая при этом применение метода контактного формования при одинаковой схеме армирования;
- толщину обшивки s в средней части корпуса судна, в соответствии с Правилами РС, следует определять как максимальное значение из двух величин: $s = \max(s_d, s_s)$, где s_d , s_s — толщина обшивки, определяемая по графикам (рис. 4), исходя из заданных требований к жесткости и прочности.

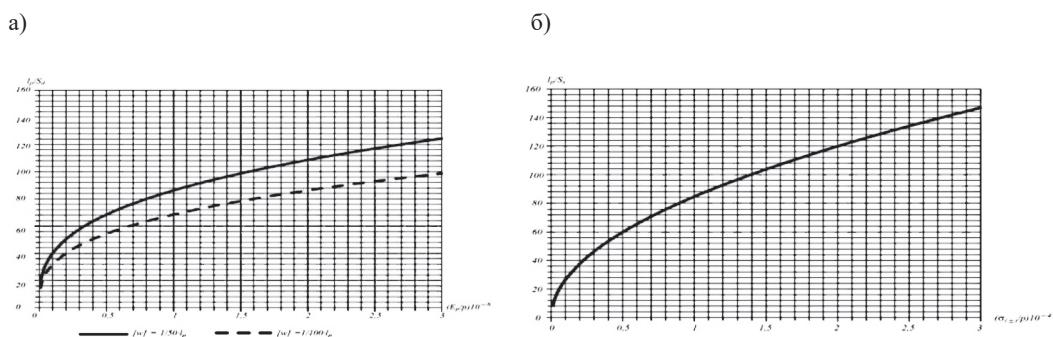


Рис. 4. Графики зависимости отношения максимальной длины l_p , м, опорного контура пластины к ее толщине s_d (s_s), м,

от отношения свойств материала E_p , $σ_{(±)}$, МПа, пластины к расчетному давлению p :

a — требование по допускаемым прогибам $[w] = 1/50 l_p$, $[w] = 1/100 l_p$;

b — требование по допускаемым напряжениям $[\sigma] = 0,36 \sigma_{(±)}$;

E_p — расчетный модуль нормальной упругости материала обшивки, МПа;

$σ_{(±)}$ — минимальное значение предела прочности материала обшивки, МПа;

l_p — длина опорного контура пластины, м

Результаты эксперимента по применению метода инфузии при переработке ПКМ в обшивку корпуса показали уменьшение толщины обшивки, изготовленной в соответствии с инструкцией, по сравнению с проектной. Из экономических соображений было принято решение второй корпус судна проекта изготавливать методом контактного формования, что позволило сохранить проектную толщину обшивки, не затрачивая средств и времени на дополнительный слой ламината.

Обсуждение (Discussion)

Отказ от применения метода инфузии позволил избежать дополнительных затрат на приобретение армирующего материала для дополнительных слоев с учетом перерасхода связующего для возможности применения метода контактного формования, затрат на расходные материалы, такие как вакуумная пленка, жертвенная ткань, сетка для распределения связующего, герметизирующий шнур, полиэтиленовые сплошные и спиральные трубы, арматура для вакуумного канала, амортизации дорогостоящего оборудования, оплаты дефицитной квалифицированной рабочей силы, а также минимизировать производственные риски в случае, когда *что-то пошло не так*.

Заключение (Conclusion)

В настоящее время в мире для изготовления корпусных конструкций водоизмещающих судов применяется стеклопластик — ПКМ на основе стекловолоконного армирующего материала. В качестве технологии изготовления конструкций традиционно применяется метод контактного формования, в последние десятилетия динамично замещаемый методом инфузии. При выборе метода Правилами РС рекомендуется учитывать степень владения верфью-изготовителем тем или иным методом изготовления конструкций, наличие квалифицированного рабочей силы и необходимого оборудования. Правилами РС рекомендуется применять преимущественно метод инфузии. Метод контактного формования допускается применять в местах, где затруднено или невозможно применение метода инфузии, например, в местах соединений и усилений конструкций. Метод напыления допускается к применению только для вспомогательных корпусных конструкций, на которые не распространяются требования Правил РС к прочности и жесткости.

Правила РС рекомендуют внедрение и применение технологически совершенных методов изготовления корпусных конструкций судов из ПКМ. В условиях рыночной экономики верфь и заказчик в процессе согласования с РС метода изготовления корпусных конструкций судна могут сделать, на первый взгляд, неочевидный выбор в пользу той или иной технологии. В рассматриваемом случае оптимальным оказался выбор в пользу метода контактного формования, так как он выглядел экономически более эффективным в первую очередь за счет применения меньшего объема основных и вспомогательных материалов, малоквалифицированной рабочей силы и отсутствия большого риска форс-мажорных обстоятельств при проведении технологических операций. Возможно, экономия на этапе строительства компенсируется затратами судовладельца на корпусные ремонтные работы по борьбе с осмотическими явлениями, приводящими к расслоению ламината в течение срока эксплуатации судна.

Объемы и степень повреждений снижаются при изготовлении корпусных конструкций, в первую очередь обшивки корпуса методом инфузии, гарантирующим более качественный ПКМ. Современные материалы и способы работы с ними, применяемые в композитном судостроении, постоянно совершенствуются и практически сводят построечные и эксплуатационные дефекты конструкций к минимуму.

Для рационального применения технологий переработки ПКМ в корпусные конструкции на этапе проектирования необходимо согласовать определение расчетных толщин не только исходя из заданных требований к жесткости и прочности материала и конструкций в целом, но и учитывая применяемый метод изготовления. Для этого, возможно, потребуются корректирующие поправки к толщинам конструкций в зависимости от применяемого метода.

Предложение о принятии метода инфузии базовым в расчетах толщины обшивки корпуса может служить одним из вариантов учета метода изготовления корпусных конструкций корпуса.

Решение задач в этой области позволит беспрепятственно внедрять и применять на производстве более совершенные технологии, использующие метод инфузии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутейников М. А. Требования Российского морского регистра судоходства к композиционным материалам. Опыт наблюдения, перспективы развития / М. А. Кутейников, С. М. Кордонец // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № S2. — С. 140–143. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-140-143. — EDN YQZQMP.
2. Францев М. Э. Проектный анализ водоизмещающих однокорпусных противоминных кораблей из композиционных материалов / М. Э. Францев // Композитный мир. — 2020. — № 4(91). — С. 58–65. — EDN PUPMZK.
3. Фирсова А. В. Технологические особенности и перспективы применения полимерных композиционных материалов при постройке судов / А. В. Фирсова, М. Ю. Щигорцов // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 4–2(58). — С. 58–66. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.006. — EDN LQXYQO.
4. Москаленко М. А. Методы изготовления корпусных конструкций судов из полимерных композиционных материалов / М. А. Москаленко, С. Е. Черняхович, И. В. Тузук // Флагман науки. — 2025. — № 1(24). — С. 391–394. — EDN LWQIOR.
5. Донецкий К. И. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 / К. И. Донецкий, М. Н. Усачева, А. В. Хрульков // Труды ВИАМ. — 2022. — № 6(112). — С. 58–67. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67. — EDN BDATWN.
6. Соколов В. В. Влияние количества слоев армирующего материала на толщину и весовые характеристики углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии / В. В. Соколов, П. Ю. Антипов, О. А. Голищев, С. В. Долинский // Пластические массы. — 2021. — № 1–2. — С. 62–64. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64. — EDN IFIITC.
7. Францев М. Э. Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации / М. Э. Францев // Контроль. Диагностика. — 2009. — № 11. — С. 61–68. — EDN LLREZB.
8. Емельянов М. Д. Ремонт осмотических повреждений наружной обшивки из стеклопластика / М. Д. Емельянов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2018. — № 50–51. — С. 14–21. — EDN UYIDUE.
9. Емельянов М. Д. Применение композиционных материалов при ремонте корпусов морских судов / М. Д. Емельянов, Э. В. Соминская // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48–49. — С. 77–84. — EDN ZULPOJ.
10. Емельянов М. Д. Упругие характеристики композитов судовых корпусных конструкций / М. Д. Емельянов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 16–22. — EDN SZIUWB.

REFERENCES

1. Kuteynikov, M. A. and S. M. Kordonets. “Composite material requirements of russian maritime register of shipping. experience and prospects for future developments.” *Transactions of The Krylov State Research Centre* S2 (2018): 140–143. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-140-143.
2. Frantsev, M. E. “Proektnyy analiz vodoizmeschayusikh odnokorpusnykh protivominnykh korabley iz kompozitsionnykh materialov.” *Composite World* 4(91) (2020): 58–65.
3. Firsova, A. V. and M. Yu. Schigortsov. “Technological features and prospects for the use of polymer composite materials in the construction of ships.” *Marine intellectual Technologies* 4–2(58) (2022): 58–66. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.006.
4. Moskalenko, M. A., S. E. Chernyakhovich and I. V. Tuzyuk. “Methods of manufacturing ship hull structures from polymer composite materials.” *Flagman nauki* 1(24) (2025): 391–394.
5. Donetskiy, K. I., M. N. Usacheva and A. V. Khrul’kov. “Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1.” *Proceedings of Viam* 6(112) (2022): 58–67. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
6. Sokolov, V. V., P. Yu. Antipov, O. A. Golishev and S. V. Dolinskiy. “Effect of number of layers of the reinforcing material on the thickness and weight characteristics of carbon fiber parts produced by vacuum infusion.” *Plasticheskie Massy* 1–2 (2021): 62–64. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64.

7. Frantsev, M. E. "The estimation mode of the fiberglass boat hull technical condition in exploitation." *Kontrol'. Diagnostika* 11 (2009): 61–68.
8. Emel'yanov, M. D. "Repair of osmotic damage to the fiberglass outer shell plating." *Nauchno-tehnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 50–51 (2018): 14–21.
9. Emel'yanov, M. D. and E. V. Sominskaya. "Application of composite materials in the repair of structures of sea-going ships." *Nauchno-tehnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 48–49 (2017): 77–84.
10. Emel'yanov, M. D. "Uprugie kharakteristiki kompozitov sudovykh korpusnykh konstruktsiy." *Nauchno-tehnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 16–22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Москаленко Михаил Анатольевич —
доктор технических наук, профессор кафедры
технологии и организации судостроения
и судоремонта
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток, ул.
Верхнепортовая, 50а
e-mail: asmsh@rambler.ru

Черняхович Станислав Евгеньевич — аспирант
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: sboats@mail.ru

Тузюк Илья Витальевич — аспирант
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: illisarjt@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moskalenko Mikhail A. —
Grand PhD in Technical Sciences,
Professor of the Department of Technology
and Organization of Shipbuilding and Ship Repair
Maritime State University
named after Admiral G. I. Nevelskoy
50a, Verkhneportovaya str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation,
e-mail: asmsh@rambler.ru

Chernyakhovich Stanislav E. — Postgraduate
Maritime State University
named after Admiral G. I. Nevelskoy
50a, Verkhneportovaya str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation,
e-mail: sboats@mail.ru

Tuzyuk Ilya V. — Postgraduate
Maritime State University
named after Admiral G. I. Nevelskoy
50a, Verkhneportovaya str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation,
e-mail: illisarjt@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 20 августа 2025 г.

Received: Aug. 20, 2025.

DEVELOPMENT OF AN ACCELERATED CORROSION–EROSION TESTING METHOD FOR MARINE DIESEL EXHAUST VALVES USING STATISTICAL EXPERIMENTAL DESIGN

K. S. Mochalin, A. A. Privalenko, V. I. Sinitzin

Siberian state university of water transport, Novosibirsk, Russian Federation

This paper addresses the problem of accelerated corrosion–erosion degradation of exhaust valves in marine diesel engines, caused by the combined effects of high temperature, aggressive sulfur compounds, and abrasive ash particles in combustion products. The main objective was to develop and validate a reproducible laboratory method that enables accelerated simulation of real operating conditions and quantitative assessment of the influence of individual factors on overall wear. A dedicated corrosion–erosion test chamber was designed to ensure precise control of sample surface temperature (650–800 °C), sulfur oxide (SO_x) concentration, solid particle content, and other environmental parameters. The test specimens were exhaust valves from a 6ChN 18/22 engine, including both uncoated samples and those with heat-resistant protective coatings. To optimize testing and maximize information yield, a fractional factorial experimental design (2⁵⁻¹) was applied, enabling systematic evaluation of five key variables. After 100-hour test cycles, a comprehensive analysis was carried out, including measurements of wear rate, microcrack depth, mass loss, and microhardness changes. Analysis of variance (ANOVA) showed that surface temperature and SO_x concentration exert the greatest influence on wear, with a pronounced synergistic interaction between SO_x and solid particles. The experiments confirmed that fuel additives reduce chemical corrosion by 30–35 %, while protective coatings decrease erosive wear by 20–25 %. Validation of the developed method against field data demonstrated good agreement, with deviations within 10–15 %. The proposed methodology serves as an effective tool for predicting the service life of exhaust valves and justifying the selection of protective measures in marine engine design and shipbuilding practice.

Keywords: exhaust valve, corrosion, erosion, marine diesel engine, corrosion–erosion test chamber, statistical experimental design, surface temperature, sulfur oxides, ash particles, protective coating, fuel additive, mass loss.

For citation:

Mochalin, Konstantin S., A. A. Privalenko and V. I. Sinitzin. "Development of an accelerated corrosion-erosion testing method for marine diesel exhaust valves using statistical experimental design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 738–746. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-738-746.

УДК: 621.431.74:620.193.2

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УСКОРЕННЫХ КОРРОЗИОННО-ЭРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫПУСКНЫХ КЛАПАНОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

К. С. Мочалин, А. А. Приваленко, В. И. Синицин

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»,
Новосибирск, Российская Федерация

Данная статья посвящена исследованию важной проблемы быстрого коррозионно-эрзационного разрушения выпускных клапанов судовых дизельных двигателей, вызванного сочетанием высоких температур, агрессивных сернистых соединений и абразивных зольных частиц, присутствующих в продуктах сгорания топлива. Основной задачей исследования является создание и валидация воспроизводимого лабораторного метода, который позволит моделировать реальные эксплуатационные условия в ускоренном режиме и количественно оценивать влияние отдельных факторов на общий износ. Для проведения экспериментов была разработана специализированная коррозионно-эрзационная камера, обеспечивающая точный контроль температуры поверхности образцов (650–800 °C), концентрации оксидов серы (SO_x), содержания твердых частиц и других параметров. В качестве объектов исследования использовались выпускные клапаны дви-

гателя бЧН 18/22, включая образцы с жаростойкими покрытиями и без них. Для оптимизации испытаний и повышения информативности был использован метод статистического планирования эксперимента — дробный факторный план 2^{5-1} , позволяющий системно оценить влияние пяти основных факторов. По итогам 100-часовых испытательных циклов был проведен комплексный анализ, включающий измерение скорости износа, глубины микротрещин, потери массы и изменения микротвердости. Статистический анализ (ANOVA) показал, что наибольшее влияние на износ оказывают температура поверхности и концентрация SO_x , а также был обнаружен значительный синергетический эффект между SO_x и твердыми частицами. Экспериментально установлено, что использование топливных присадок снижает химическую коррозию на 30–35 %, а защитные покрытия уменьшают эрозионный износ на 20–25 %. Валидация метода, проведенного путем сравнения с натурными данными, показала хорошую согласованность результатов (расхождение в пределах 10–15 %). Разработанный метод является эффективным инструментом для прогнозирования ресурса выпускных клапанов и обоснования выбора защитных стратегий в судостроении.

Ключевые слова: выпускной клапан, коррозия, эрозия, судовой дизельный двигатель, лабораторная камера, статистическое планирование эксперимента, температура поверхности, оксиды серы, зола, защитное покрытие, присадка, потеря массы.

Для цитирования:

Мочалин К. С. Разработка метода ускоренных коррозионно-эрэзионных испытаний выпускных клапанов судовых дизелей с применением статистического планирования эксперимента / К. С. Мочалин, А. А. Приваленко, В. И. Синицин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 738–746. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-738-746. — EDN TFGKBE.

Введение (Introduction)

Эксплуатация выпускных клапанов судовых дизельных двигателей сопряжена с интенсивным комбинированным воздействием высоких температур, агрессивных газовых компонентов, в первую очередь оксидов серы, и абразивных зольных частиц, содержащихся в продуктах сгорания судового топлива [1]. Это приводит к ускоренной деградации материала клапанов, проявляющейся в коррозионно-эрэзионном износе, термоусталостном растрескивании и образовании отложений. Следствием данных процессов являются снижение эффективности работы двигателя, рост эксплуатационных расходов и повышенный риск внезапных отказов, что является особенно критичным в условиях морской эксплуатации. При этом существующие методы оценки ресурса, основанные преимущественно на длительных натурных испытаниях, требуют значительных временных и материальных затрат, что затрудняет оперативную разработку и апробацию эффективных защитных мер.

Проблема коррозионно-эрэзионного износа высокотемпературных компонентов двигателей нашла отражение в ряде научных работ. Так, исследование [2] посвящено анализу механизмов повреждения клапанов под воздействием сернистых соединений и твердых частиц. Международные стандарты регламентируют методики проведения эрозионных испытаний, однако часто не учитывают комплексный характер воздействия, характерный для реальных условий. Процессы высокотемпературной коррозии металлов подробно рассмотрены в исследовании [3]. В отечественной практике вопросы стойкости клапанов регламентированы такими документами, как ГОСТ Р 54909–2012, и исследованы в работах [4, 6], где анализируется влияние качества топлива на износ деталей.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований, сохраняется существенный пробел в области комплексного лабораторного моделирования синергетического воздействия коррозии и эрозии в условиях, максимально приближенных к реальной работе выпускной системы судового дизеля. Существующие лабораторные методики зачастую не позволяют одновременно контролировать и варьировать ключевые параметры, такие как температура поверхности, концентрация SO_x и содержание зольных частиц, а также оценивать влияние защитных покрытий и топливных присадок в рамках единого экспериментального подхода. Отсутствие воспроизводимых и стандартизованных методов ускоренных испытаний, сочетающих физическое моделирование со статистическим анализом для минимизации числа опытов, ограничивает возможности достоверного прогнозирования ресурса клапанов и оптимизации стратегий их защиты.

Целью исследования является разработка и валидация лабораторного метода ускоренных коррозионно-эррозионных испытаний выпускных клапанов, позволяющего количественно оценить вклад основных эксплуатационных факторов в износ и эффективность защитных мер для повышения ресурса клапанов в судовых дизельных двигателях. Для достижения поставленной цели была сконструирована специализированная коррозионно-эррозионная камера, обеспечивающая регулирование температуры поверхности (650 – 800 °C), концентрации сернистых газов (SO_x), содержания зольных частиц, а также возможность тестирования присадок и защитных покрытий. Применение методов статистического планирования эксперимента (дробный факторный план 2^{5-1}) позволило системно варьировать пять ключевых факторов и минимизировать число опытов при максимизации информативности результатов [5].

В ходе работы были решены следующие задачи: проведение серии экспериментов с комплексной оценкой откликов (скорость износа, глубина микротрещин, состав отложений, потеря массы и изменение твердости); статистический анализ полученных данных для выявления значимости факторов; валидация методики путем сравнения с натурными данными. Установлено, что наибольшее влияние на износ оказывают температура и концентрация SO_x , а также их взаимодействие с твердыми частицами. Присадки снижают коррозию на 30–35 %, а покрытия — эрозию на 20–25 %.

Сравнение с натурными данными подтвердило адекватность методики (расхождение ≤ 15 %). Теоретическая значимость работы заключается в установлении количественных зависимостей между параметрами эксплуатационной среды и характеристиками износа, а практическая ценность состоит в создании надежного инструмента для прогнозирования ресурса клапанов и обоснования выбора материалов, покрытий и присадок для судовых дизельных двигателей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Экспериментальное исследование проводилось на специализированной коррозионно-эррозионной камере, разработанной для моделирования агрессивной среды выпускного тракта судового дизеля в лаборатории Сибирского государственного университета водного транспорта. Схема камеры представлена на рис. 1. Установка обеспечивала точный контроль ключевых параметров: температуры поверхности образца (650 – 800 °C), концентрации оксидов серы (SO_x) в газовой смеси (0,5–1,0 %) и концентрации твердых зольных частиц (1–5 г/м³).

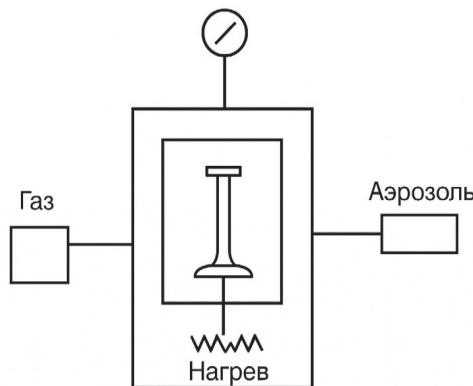


Рис. 1. Схема камеры ускоренных испытаний

740 Конструкция камеры включает: теплоизолированный корпус с фиксатором образца; нагревательный блок, обеспечивающий рабочую температуру поверхности до 800 °C; систему подачи газовой смеси (SO_2 , SO_3 , H_2O) с регулируемыми параметрами; форсунку для ввода аэрозольных зольных частиц различного гранулометрического состава; комплекс датчиков для контроля температуры, давления и концентрации среды, а также систему отвода и фильтрации газов, обеспечивающую безопасные условия лабораторных испытаний.

На рис. 2 представлена собранная в лаборатории камера коррозионно-эррозионного воздействия, разработанная для воспроизведения условий эксплуатации выпускных клапанов судовых дизельных двигателей. Камера ускоренных испытаний представляет собой герметичный корпус, в котором размещен исследуемый выпускной клапан. Камера оснащена системой нагрева, обеспечивающей температуру поверхности образца до 700–800 °С. Через боковые каналы в камеру подаются газовая смесь (SO_2 , SO_3 , H_2O) и аэрозольные частицы золы, что позволяет моделировать коррозионно-эррозионное воздействие реальных условий эксплуатации. Давление и скорость потока контролируются с помощью манометра и регулирующих устройств.



Рис. 2. Опытный образец камеры испытаний

В качестве объектов исследования использовались выпускные клапаны судового дизеля 6ЧН 18/22, включая образцы без покрытия и с жаростойким покрытием, которые представлены на рис. 3.



Рис. 3. Выпускные клапаны двигателя 6ЧН 18/22

Для эффективной оценки влияния множества факторов при минимальном количестве опытов был применен один из методов статистического планирования эксперимента, а именно дробный факторный план $2^{(5-1)}$ [5, 8]. Данный план позволял системно варьировать пять ключевых факторов на двух уровнях каждый: температуру поверхности клапана (650 °С / 800 °С), концентрацию SO_x (0,5 % / 1,0 %), концентрацию твердых частиц (1 г/м³ / 5 г/м³), наличие топливной присадки (нет / да) и наличие защитного покрытия (нет / да). Испытания для каждой комбинации факторов проводились в течение 100-часового цикла, после чего измерялись следующие отклики: скорость износа (мкм/ч), глубина микротрещин (СЭМ), состав отложений (ЭДС/РФА), утрата массы (мг/см²) и изменение твердости поверхности (HV) [3].

В августе 2025 г. в лаборатории СГУВТ были выполнены экспериментальные исследования. Испытания проводились согласно плану, изложенному в табл. 1. Каждый эксперимент включал 100-часовое непрерывное воздействие коррозии и эрозии на образцы выпускных клапанов в контролируемой среде испытательной камеры. После завершения каждого цикла образцы подвергались комплексному анализу.

Таблица 1
План эксперимента

Номер опыта	Температура поверхности клапана, °C	Концентрация SO _x , %	Концентрация твердых частиц, г/м ³	Присадка	Покрытие
1	650	0,5	1	Нет	Нет
2	800	0,5	1	Да	Нет
3	650	1,0	1	Да	Да
4	800	1,0	1	Нет	Да
5	650	0,5	5	Да	Да
6	800	0,5	5	Нет	Да
7	650	1,0	5	Нет	Нет
8	800	1,0	5	Да	Нет

Для оценки деградации материала применялись сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) [3] для изучения морфологии поверхности и глубины микротрещин, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия и рентген флуоресцентный анализ (ЭДС/XRF) для определения элементного состава коррозионных отложений, а также измерение микротвердости по Виккерсу для оценки изменений механических свойств поверхностного слоя.

Результаты и их обсуждение (Results and discussion)

Проведенный статистический анализ результатов испытаний позволил количественно оценить влияние контролируемых факторов на износ выпускных клапанов, как показано на рис. 4. Наибольший вклад в скорость деградации материала вносят температура поверхности клапана и концентрация оксидов серы (SO_x) в газовой среде [1, 6].

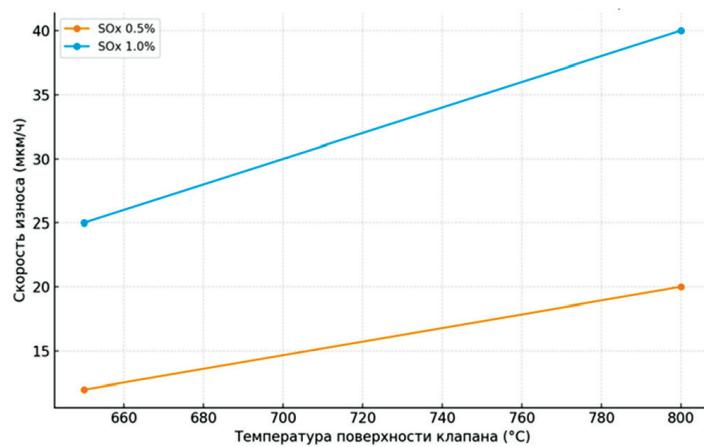


Рис. 4. Зависимость скорости износа от температуры и концентрации SOx

Дисперсионный анализ (ANOVA), результаты которого представлены на рис. 5, подтвердил статистическую значимость этих параметров, а также выявил сильный синергетический эффект для пары «SO_x – твердые частицы», свидетельствующий о взаимном усилении коррозионного и эрозионного воздействия.

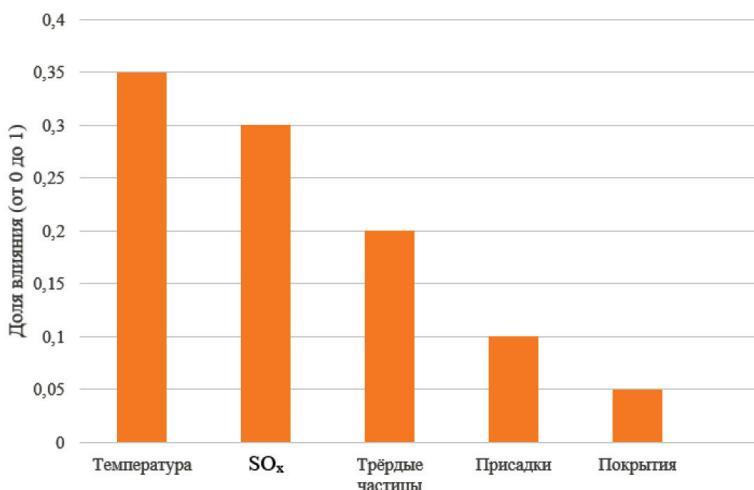


Рис. 5. ANOVA-диаграмма влияния факторов на износ клапана

Полные количественные данные по всем критериям отклика сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний

Номер опыта	Утрата массы, мг/см ²	Скорость износа, мкм/ч	Глубина микротрещин, мкм	Изменение твердости, ΔHV	Примечания
1	5,0	40	12,5	-15	Базовый (T = 650 °C, SO _x = 0,5, без присадок / покрытия)
2	4,0	32	9,8	-10	Присадки, снижающие химическую коррозию
3	3,2	25	7,0	-6	Присадки + покрытие — комбинированная защита
4	4,6	36	11,0	-12	Покрытие при повышении T/SO _x
5	6,8	48	15,2	-18	Повышенная концентрация частиц (5 г/м ³) при низкой T/SO _x
6	5,5	42	13,0	-14	Покрытие, но высокие частицы
7	7,5	55	18,0	-20	Высокие T (800 °C) и SO _x (1,0 %) без защиты
8	5,0	34	10,2	-11	Присадки при высоких T/SO _x — частичное снижение износа

Анализ данных показал, что применение топливных присадок способствует снижению химической коррозии на 30–35 %, в то время как защитные покрытия эффективно уменьшают эрозионную составляющую износа на 20–25 %.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения защитных мер для снижения коррозионно-эрэзионного износа выпускных клапанов. Как видно из данных, представленных на рис. 6, использование топливных присадок и защитных покрытий позволяет существенно уменьшить деградацию материала.

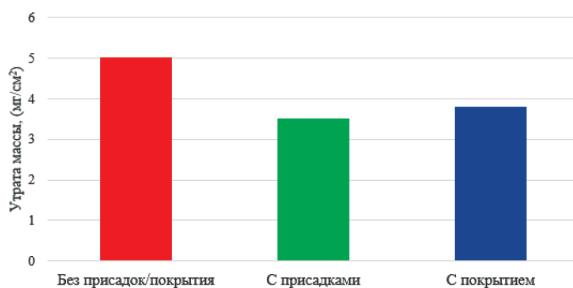


Рис. 6. Влияние присадок и покрытий на утрата массы

Дополнительным подтверждением этой тенденции является представленный сравнительный анализ данных в табл. 3 и их графическая интерпретация на рис. 7, где четко прослеживается последовательное улучшение всех ключевых показателей износа: утрата массы, скорости износа и сохранение твердости при использовании защитных средств, особенно при их комбинированном применении.

Таблица 3

Сравнительные результаты по основным критериям износа

Условие	Утрата массы, мг/см ²	Скорость износа, мкм/ч	Изменение твердости, HV
Без присадок / покрытия	5,0	40	-15
С присадками	3,5	28	-8
С покрытием	3,8	30	-10
С присадками и покрытием	2,5	20	-5

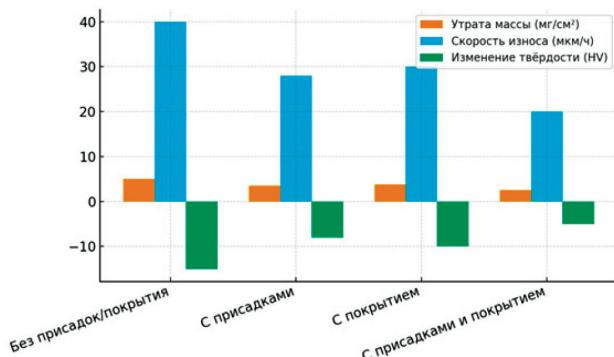


Рис. 7. Сравнительный анализ условий испытаний по трем критериям износа

Наблюдаемое снижение масс потерь при введении присадок объясняется их способностью нейтрализовать агрессивные сернистые соединения в газовой фазе, что тормозит развитие химической коррозии [7]. В свою очередь, защитные покрытия служат барьером, повышающим стойкость поверхности к абразивному воздействию зольных частиц [9, 10]. Наибольший синергетический эффект достигается при комбинированном использовании обоих методов, что подтверждается максимальным снижением утраты массы до 2,5 мг/см² и скорости износа до 20 мкм/ч.

Важным подтверждением адекватности разработанного метода является сравнение с натуральными данными: сопоставление ускоренных скоростей износа с результатами натурных испытаний показало близкое совпадение в пределах 10–15 %. Такое расхождение подтверждает корректность лабораторной модели и возможность ее использования для достоверного прогнозирования ресурса клапанов в реальных условиях эксплуатации судовых дизелей. Полученные результаты позволяют сформировать обоснованные рекомендации по применению защитных покрытий и топливных присадок для значительного увеличения межремонтного периода выпускной системы.

Заключение (Conclusion)

В ходе работы достигнута поставленная цель: разработан и валидирован лабораторный метод ускоренных коррозионно-эррозионных испытаний, который позволяет в контролируемых условиях моделировать агрессивное воздействие на выпускные клапаны судовых дизельных двигателей. Применение статистического планирования эксперимента (DoE) обеспечило количественную оценку вклада химических и механических факторов в суммарный износ. Использование ANOVA позволило выявить наиболее значимые параметры: температуру поверхности и концентрацию SO_x , а также синергетический эффект между SO_x и твердыми частицами [8]. Экспериментально подтверждена эффективность защитных мер — топливные присадки снижают химическую коррозию на 30–35 %, а защитные покрытия уменьшают эрозионный износ на 20–25 %. Сравнение с натурными данными показало адекватность метода (расхождение $\leq 15\%$).

Таким образом, разработанный метод является надежным инструментом для прогнозирования ресурса клапанов и формирования обоснованных рекомендаций по применению защитных покрытий и топливных присадок, что позволяет существенно увеличить межремонтный период выпускной системы судовых дизелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чанчиков В. А. Исследование и разработка перспективных смазочных материалов для применения в судовых дизельных двигателях и повышения ресурса цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания / В. А. Чанчиков, И. Н. Гужвенко, А. И. Андреев [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 62–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-62-74. — EDN VHSUSF.
2. Grzesik Z. High temperature corrosion of valve steels in combustion gases of petrol containing ethanol addition / Z. Grzesik, G. Smola, K. Adamaszek, Z. Jurasz, S. Mrowec // Corrosion Science. — 2013. — Vol. 77. — Pp. 369–374. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.08.030.
3. Young D. J. High temperature oxidation and corrosion of metals / D. J. Young — Elsevier, 2023. — 750 p.
4. Карева Н. Т. Исследование трещинообразования при изготовлении выпускного клапана ДВС / Н. Т. Карева, Д. Т. Чунгаков, Н. А. Заварцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. — 2019. — Т. 19. — № 2. — С. 44–52. DOI: 10.14529/met190205. — EDN JLHSEN.
5. Montgomery D. C. Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020. — 724 p.
6. Li D.-F. Erosion — corrosion resistance of Mo–Ti- and Ni–Cr–Mo-alloyed medium-carbon martensitic steels: a critical analysis of synergistic effect of erosion and corrosion / D.-F. Li, H.-Y. Dong, C.-Y. Hu, K.-M. Wu, S. Yershov, O. Isayev // Journal of Iron and Steel Research International. — 2022. — Vol. 29. — Is. 8. — Pp. 1299–1311.
7. Ганиев И. Н. Анодное поведение сплавов системы Zn-in / И. Н. Ганиев, Г. М. Атоев, Р. Д. Исмонов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2025. — № 3(169). — С. 101–109. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-101-109. — EDN HBMTHA.
8. Баранов А. Н. Применение методов планирования эксперимента при прогнозировании величины износстойкости инструментальной оснастки / А. Н. Баранов, Е. М. Баранова, А. И. Титоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2016. — № 11–1. — С. 166–178. — EDN XDYLNZ.
9. Александров Д. А. Исследование эрозионно-коррозионностойких покрытий для защиты титановых моноколес вертолетных газотурбинных двигателей / Д. А. Александров, О. Н. Доронин, П. Л. Журавлева, А. С. Бенклян // Труды ВИАМ. — 2023. — № 9(127). — С. 90–100. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100. — EDN FAOPGJ.
10. Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology / J. R. Davis — Materials Park, OH: ASM International, 2019. — 338 p.

REFERENCES

1. Chanchikov, V. A., I. N. Guzhvenko, A. I. Andreev et al. "Research and development of commercially viable lubricants to intensify working life of marine diesel engines and cylinder piston group in internal combustion engines." *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 4 (2021): 62–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-62-74.

2. Grzesik, Z., S. Mrowec, et al. "High temperature corrosion of valve steels in combustion gases of petrol containing ethanol addition." *Corrosion Science* 77 (2013): 369–374. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.08.030.
3. Young, D. J. *High temperature oxidation and corrosion of metals*. Elsevier, 2023: 750.
4. Kareva, N. T., D. T. Chungakov and N. A. Zavartsev. "The research of cracking in the fabrication of the internal-combustion engine exhaust valve." *Bulletin of The South Ural State University. Ser. Metallurgy* 19.2 (2019): 44–52. DOI: 10.14529/met190205.
5. Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020: 724.
6. Li, D.-F., H.-Y. Dong, et al. "Erosion — corrosion resistance of Mo–Ti- and Ni–Cr–Mo-alloyed medium-carbon martensitic steels: a critical analysis of synergistic effect of erosion and corrosion." *Journal of Iron and Steel Research International* 29.8 (2022): 1299–1311.
7. Ganiev, I. N., G. M. Atoev et al. "Anode behavior of Zn-in system alloys." *Bulletin of The Kuzbass State Technical University* 3(169) (2025): 101–109. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-101-109.
8. Baranov, A. N., E. M. Baranova and A. I. Titorov. "Application of methods experiment planning the issues of forecasting the magnitude of the wear resistance of tooling." *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* 11–1 (2016): 166–178.
9. Aleksandrov, D. A., O. N. Doronin, P. L. Zhuravleva and A. S. Benklyan. "The research of erosion-corrosion-resistant coatings for protection of titanium impellers for helicopter gas-turbine engine." *Proceedings of Viam* 9(127) (2023): 90–100. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100.
10. Davis, J. R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. Materials Park, OH: ASM International, 2019: 338.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мочалин Константин Сергеевич —
кандидат технических наук,
проректор по учебной работе
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет
водного транспорта»
ФГБОУ ВО «СГУВТ»
630099, Новосибирская область, г. Новосибирск,
ул. Щетинкина, 33
e-mail: mochalin@nsawt.ru

Приваленко Алексей Александрович —
заместитель директора института
«Морская академия» по учебной работе
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет
водного транспорта»
ФГБОУ ВО «СГУВТ»
630099, Новосибирская область, г. Новосибирск,
ул. Щетинкина, 33
e-mail: a.a.privalenko@nsawt.ru

Синицин Владислав Игоревич —
ассистент кафедры
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет
водного транспорта»
ФГБОУ ВО «СГУВТ»
630099, Новосибирская область, г. Новосибирск,
ул. Щетинкина, 33
e-mail: v.i.sinitsin@nsawt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mochalin Konstantin S. —
PhD in Technical Sciences,
Vice-Rector for Academic Affairs
Federal State-Financed Educational Institution
of Higher Education "Siberian State University
of Water Transport"
FSEI HE "SSUWT"
33, Shchetinkina str., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: mochalin@nsawt.ru

Privalenko Alexey A. —
Deputy Director of the Institute
"Maritime Academy"
Federal State-Financed Educational Institution
of Higher Education "Siberian State University
of Water Transport"
FSEI HE "SSUWT"
33, Shchetinkina str., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: a.a.privalenko@nsawt.ru

Sinitsin Vladislav I. —
Associate lecturer
Federal State-Financed Educational Institution
of Higher Education "Siberian State University
of Water Transport"
FSEI HE "SSUWT"
33, Shchetinkina str., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: v.i.sinitsin@nsawt.ru

PROTOTYPE OF A FAULT IDENTIFICATION DEVICE IN THE INFORMATION AND MEASUREMENT CHANNEL OF A PRESSURE SENSOR

A. A. Zhitnikov, A. A. Marchenko

Kamchatka State Technical University,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

This paper presents the development and experimental testing of a prototype device designed to reduce false alarms in automated control systems of marine power plants. The study examines the architectural features of modern automation systems used at maritime facilities and identifies the main types of failures occurring in information and measurement channels associated with pressure control, one of the key parameters in ship monitoring and control systems. Based on this analysis, the hardware and software components of a prototype device implementing algorithms for fault identification in pressure sensors were developed. The prototype was experimentally tested under simulated fault conditions to evaluate its performance. The results confirmed the device's effectiveness in detecting the most common defects in measurement circuits, while also revealing limitations related to its inability to diagnose certain complex types of sensor failures. To enhance the functional completeness of the system, an additional algorithm is proposed for integrating the device into the architecture of an automated control system to enable more accurate decision-making when fault symptoms are detected. The results of the study can be applied in the modernization of existing control and protection systems of marine power plants to improve their resistance to false triggering and ensure safe and reliable operation of ship equipment.

Keywords: automated control system, marine power plant, information and measurement channel, pressure sensor, false alarm, device prototype, fault identification, technical diagnostics, signal processing algorithm, experimental verification, measurement error, control system reliability.

For citation:

Zhitnikov, Aleksandr A. and A. A. Marchenko. "Prototype of a fault identification device in the information and measurement channel of a pressure sensor." Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 17.5 (2025): 747–755. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-747-755.

УДК 629.5.06

ПРОТОТИП УСТРОЙСТВА ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИСПРАВНОСТИ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

А. А. Житников, А. А. Марченко

ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет»,
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

В данной работе представлено исследование, направленное на разработку и экспериментальную проверку прототипа устройства, предназначенного для предотвращения ложных срабатываний в автоматизированных системах управления судовыми энергетическими установками. В рамках исследования выполнен анализ архитектурных особенностей современных систем автоматизации, используемых на морских объектах, а также выявлены основные типы отказов информационно-измерительных каналов, связанных с контролем давления — одного из ключевых параметров систем мониторинга и регулирования. На основе проведенного анализа разработаны технические и программные компоненты прототипа устройства, реализующего алгоритмы идентификации неисправностей датчиков давления. Представленная модель была подвергнута экспериментальной проверке, в ходе которой оценивалась ее работоспособность в условиях имитации различных видов отказов. Полученные результаты позволили подтвердить эффективность устройства в части распознавания наиболее распространенных дефектов измерительных цепей. Вместе с тем исследование выявило ограничения разработанного устройства, обусловленные невозможностью диагностировать отдельные виды сложных отказов измерительной аппаратуры. Для повышения функциональной полноты системы предложен дополнительный алгоритм интеграции устройства в структуру автоматизированной системы управления, обеспечивающий более точное принятие решений при наличии признаков неисправности. Результаты работы могут быть использованы при модернизации существую-

ших систем контроля и защиты судовых энергетических установок с целью повышения их устойчивости к ошибочным срабатываниям и обеспечения безопасной эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, судовая энергетическая установка, информационно-измерительный канал, датчик давления, ложное срабатывание, прототип устройства, идентификация неисправностей, техническая диагностика, алгоритм обработки сигналов, экспериментальная проверка, погрешность измерения, надежность систем управления.

Для цитирования:

Житников А. А. Прототип устройства идентификации неисправности в информационно-измерительном канале датчика давления / А. А. Житников, А. А. Марченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 747–755. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-747-755. — EDN VQNURJ.

Введение (Introduction)

На современном этапе развития морского транспорта судовые энергетические установки представляют собой высокотехнологичные интегрированные системы, в которых автоматизация играет ключевую роль. Эта тенденция обусловлена ростом требований к надежности, экологической безопасности, энергоэффективности и экономической целесообразности при эксплуатации судовых механизмов и систем. В связи с этим технические средства автоматизации становятся неотъемлемой частью жизнедеятельности судна, обеспечивая как нормальный режим работы, так и защиту от аварийных ситуаций.

Функционирование современной системы автоматизации СЭУ осуществляется на основе взаимодействия разнообразных технических устройств, объединенных в единую информационно-управляющую сеть [1], [2]. Такие системы строятся по многоуровневому принципу, что позволяет обеспечить гибкость управления, повысить отказоустойчивость и упростить процесс обслуживания оборудования [3]. Обычно выделяют три основных уровня архитектуры систем автоматизации. На нижнем уровне располагаются исполнительные механизмы и датчики, отвечающие за получение информации о состоянии узлов, механизмов и параметрах работы технологического процесса, на среднем уровне — программируемые логические контроллеры, которые обрабатывают информацию согласно заданному алгоритму и формируют управляющие сигналы [4]. На верхнем уровне располагаются устройства диспетчеризации и сбора информации о состоянии технологического процесса, представленные в виде человеко-машинных интерфейсов для управления и задания определенных режимов работы СЭУ [5], [6].

Особое внимание в системах автоматизации уделяется заданию и поддержанию уставок технологических параметров. Эти программно-заданные значения являются критериями нормального функционирования агрегатов и устройств и служат основой для реализации защитных функций. При превышении допустимых значений параметров система может инициировать различные мероприятия по предотвращению аварийных ситуаций: отключение отдельных узлов, переход на аварийный режим работы, снижение нагрузки или изменение режима функционирования механизмов. Таким образом, своевременная и корректная реакция системы на изменения технологического процесса напрямую зависит от точности задания уставок и правильности обработки сигналов.

Не менее важным является вопрос надежности информационно-измерительных каналов. Поскольку вся информация, используемая для принятия решений, поступает через датчики и линии связи, выход из строя даже одного элемента может повлечь за собой некорректную работу всей системы [7], [8]. Например, неисправность датчика температуры может вызвать ложное срабатывание аварийно-предупредительной сигнализации, что в свою очередь может привести к необоснованной остановке главного двигателя или другого оборудования [9]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что эффективность функционирования СЭУ в значительной степени определяется качеством и надежностью ее автоматизированной системы управления. Современные подходы к построению таких систем, основанные на модульности, гибкости и распределенной обработке информации, позволяют обеспечивать высокую степень автоматизации, однако требуют постоянного внимания к состоянию информационно-измерительных каналов [10], [11].

Целью данного исследования является разработка программно-аппаратного устройства идентификации неисправности датчика давления, которая может быть применена в автоматизированной системе управления с целью предотвращения ложной остановки агрегатов и узлов СЭУ из-за неисправности средства измерения давления, связанной с проблемами внешнего характера.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве материалов исследования будет рассмотрен информационно-измерительный канал автоматизированной системы управления, ключевым элементом которого является датчик избыточного давления «Метран-150TG». Данные измерительные устройства относятся к ряду умных, т. е. имеют возможность конфигурирования параметров при помощи соединения по протоколу HART. Кроме того, данное устройство имеет возможность самодиагностики внутренних элементов и узлов.

В основу построения алгоритма микроконтроллера устройства идентификации неисправности датчика заложены данные о переходных характеристиках средства измерения давления (рис. 1). Данная информация нормирована производителем и для рассматриваемой модели представляет две характеристики: время запаздывания и время переходного процесса.

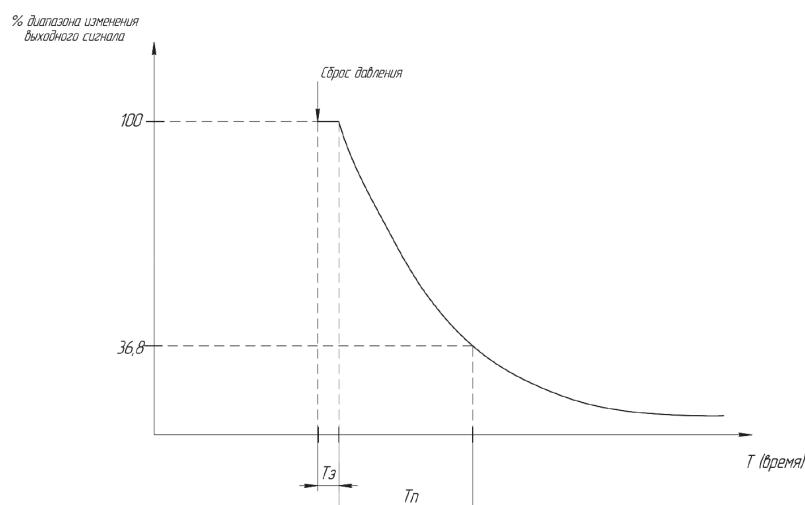


Рис. 1. График динамических характеристик датчика давления «Метран-150 TG»:
 T_3 (время запаздывания) — 90 мс; T_n (время переходного процесса) — 100 мс

Данные времени переходного процесса нормируются для полного диапазона измерения. Это означает, что при резком сбросе давления от верхнего до нижнего уровня датчик изменит свое показание за 190 мс на 63,2 % от диапазона измерения.



Рис. 2. Конфигурирование датчика избыточного давления «Метран-150 TG»

В метрологической лаборатории датчик давления был сконфигурирован при помощи HART-коммуникатора (рис. 2). После этого он имеет следующие параметры работы:

- диапазон измерения от 0,2 до 1 МПа;
- время электронного демпфирования выходного сигнала — 0,045 с;
- тип аналогового выходного сигнала — 4–20 мА;

Результаты (Results)

Устройство идентификации неисправности информационно-измерительного канала давления представляет собой программно-аппаратное устройство, считывающее показания аналогового выходного сигнала токовой петли.

Алгоритм устройства (рис. 3) будет определять изменение параметра выходного аналогового сигнала датчика давления и контролировать работу средства измерения в диапазоне. В случае отклонения параметра за границы диапазона или превышения скорости изменения показаний за единицу времени устройство идентификации выдаст дискретный сигнал, сигнализирующий о неисправности в информационно-измерительном канале.

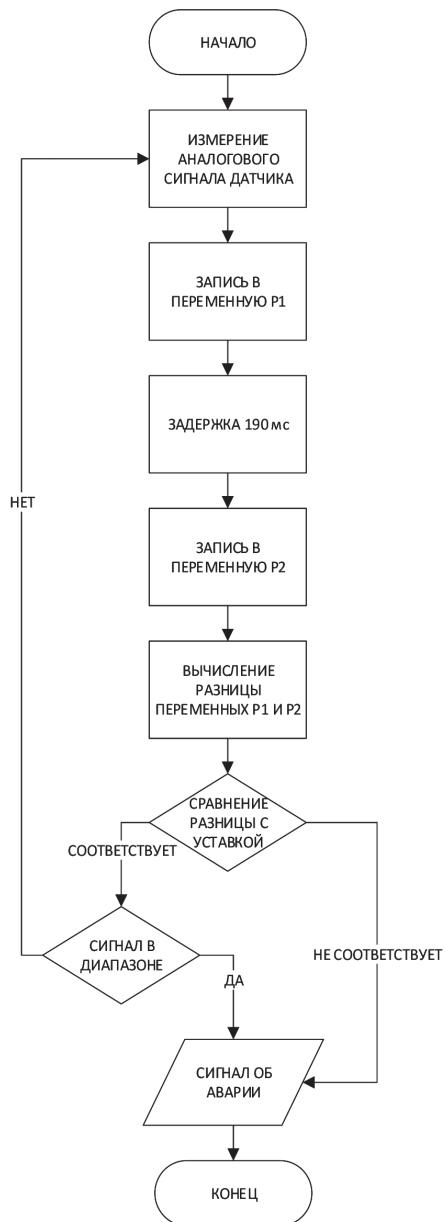


Рис. 3. Алгоритм работы устройства идентификации неисправности информационно-измерительного канала давления

В основу алгоритма обработки данных микроконтроллером заложена математически вычисляемая величина изменения показаний аналогового выходного сигнала датчика давления за единицу времени. Для полного диапазона измерения датчика максимально возможной величиной изменения аналогового выходного сигнала 4–20 мА за 190 мс является значение 10,112 мА.

Аппаратная часть устройства идентификации неисправности информационно-измерительного канала давления строится на базе микроконтроллера ATmega 328PU. Кроме того, для интеграции данного устройства в автоматизированную систему управления судовой энергетической установки микроконтроллеру необходимы периферийные элементы.

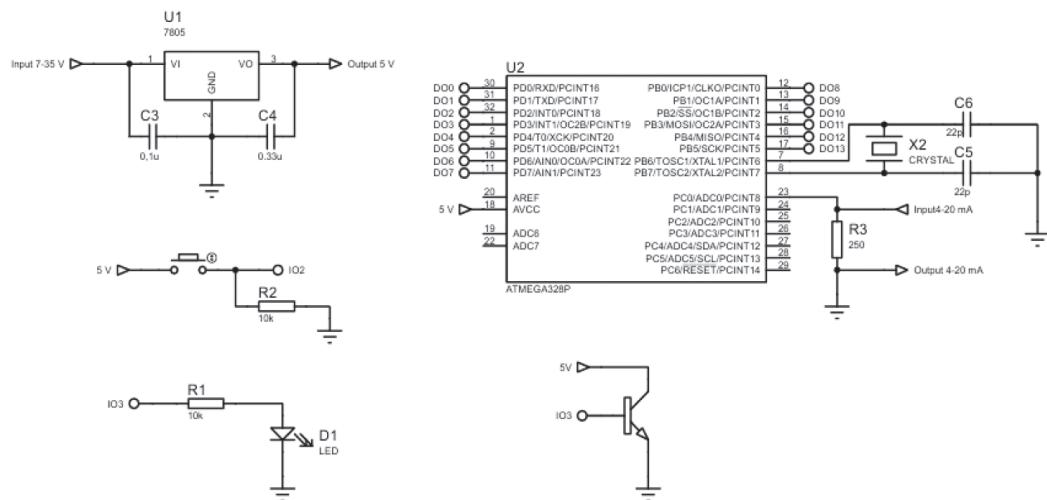


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема устройства идентификации неисправности датчика давления

Организация питания устройства осуществляется через стабилизатор напряжения L7805CV — DG, подключенный к двум конденсаторам с номинальной емкостью 0,1 нФ и 0,33 нФ. Микроконтроллер соединяется с внешним тактовым генератором 16 МГц, подключенным к конденсаторам с номинальной емкостью 22 пФ. Выходной аналоговый сигнал датчика давления конвертируется при помощи резистора с номинальным сопротивлением 220 Ом в сигнал напряжения 0,88–4,4 В.

В качестве средств идентификации неисправности в устройстве используется IGBT-транзистор и красный светодиод, подключенный последовательно с резистором, имеющим номинальное сопротивление 220 Ом. Для обеспечения сброса ошибки на устройстве будет применяться кнопка, подключенная через резистор 10 кОм. Прототип устройства, собранного на распаечной макетной плате, приведен на рис. 5.

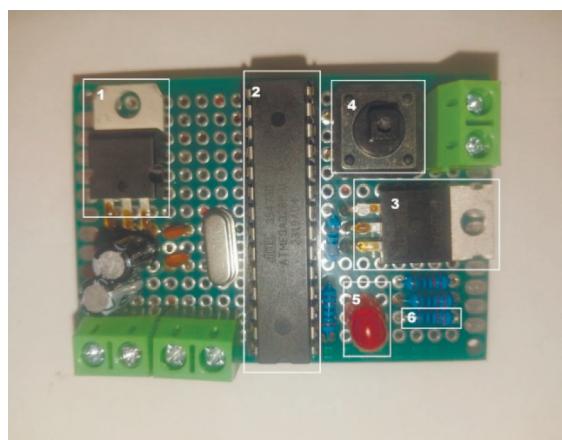


Рис. 5. Прототип устройства идентификации неисправности датчика давления:
 1 — стабилизатор напряжения; 2 — микроконтроллер; 3 — транзистор;
 4 — кнопка; 5 — светодиод; 6 — резистор 220 Ом

Процедура проведения проверки заключалась в скачкообразном изменении аналогового выходного сигнала с калибратора Beamex MC5-B-IS. Для этого эталонное средство задания аналогового выходного сигнала подключалось к устройству идентификации неисправности датчика давления и источнику питания ATH-2031 последовательно (рис. 6).



Рис. 6. Процедура проведения проверки

Изменение аналогового сигнала производилось на 11 мА как на уменьшение, так и на увеличение. Кроме того, выполнялась проверка выхода аналогового сигнала за пределы диапазона измерения на 1 мА для верхнего и нижнего диапазонов. Во всех случаях устройство, отработав корректно, выдало дискретный сигнал на выходе.

Обсуждение (Discussion)

Ложные срабатывания представляют собой реакцию защитной системы на сигналы, не соответствующие реальному аварийному состоянию оборудования. Причины возникновения подобных ситуаций различны — начиная от ошибок программного обеспечения и заканчивая физическими повреждениями измерительных цепей. Подобные обстоятельства не только нарушают штатную эксплуатацию оборудования, но и создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций, особенно если система защиты реагирует на ложный сигнал в условиях высокой нагрузки или ограниченной возможности дублирования функций. Кроме того, частые ложные срабатывания снижают доверие экипажа к автоматическим системам, что в дальнейшем может привести к игнорированию действительно важных предупреждений.

Основными источниками некорректной работы средств измерения давления являются следующие факторы:

- нарушение целостности клеммного соединения датчика, приводящее к разрыву электрической цепи или увеличению переходного сопротивления;
- попадание влаги под корпус или крышку датчика, что может вызывать изменение выходного сигнала вследствие коррозии контактов или изменения диэлектрических свойств среды;
- механическое повреждение проводов связи, обусловленное вибрацией, трением о конструкции или неправильной прокладкой кабеля;
- электромагнитные помехи и наводки, возникающие вследствие близости силовых кабелей, несоблюдение правил экранирования или заземления.
- дребезжание контактных соединений средства измерения из-за вибраций.

Все указанные факторы способны привести к искажению информационного сигнала, передаваемого от датчика к контроллеру, что в свою очередь может быть интерпретировано системой защиты как критическое отклонение параметра от нормы. В результате происходит необоснованное отключение агрегата, переход на аварийный режим работы или даже полная остановка.

Данное устройство позволяет осуществлять постоянный контроль за целостностью линий связи, анализировать параметры сигналов, а также выявлять потенциально опасные отклонения

в работе датчиков до момента их выхода из строя. Все это позволяет своевременно предпринять профилактические меры, чтобы исключить возможность ложного срабатывания и повысить общую отказоустойчивость автоматизированной системы управления.

К слабым местам данного устройства относится его неспособность к идентификации неисправностей метрологического характера. Такие проблемы, как дрейф нуля или выход за пределы погрешности средства измерения, данное устройство определить не в состоянии.

С целью повышения эффективности устройства путем предотвращения остановки агрегатов СЭУ его можно интегрировать в автоматизированную систему управления, используя дополнительные алгоритмы в программируемых логических контроллерах (рис. 7).

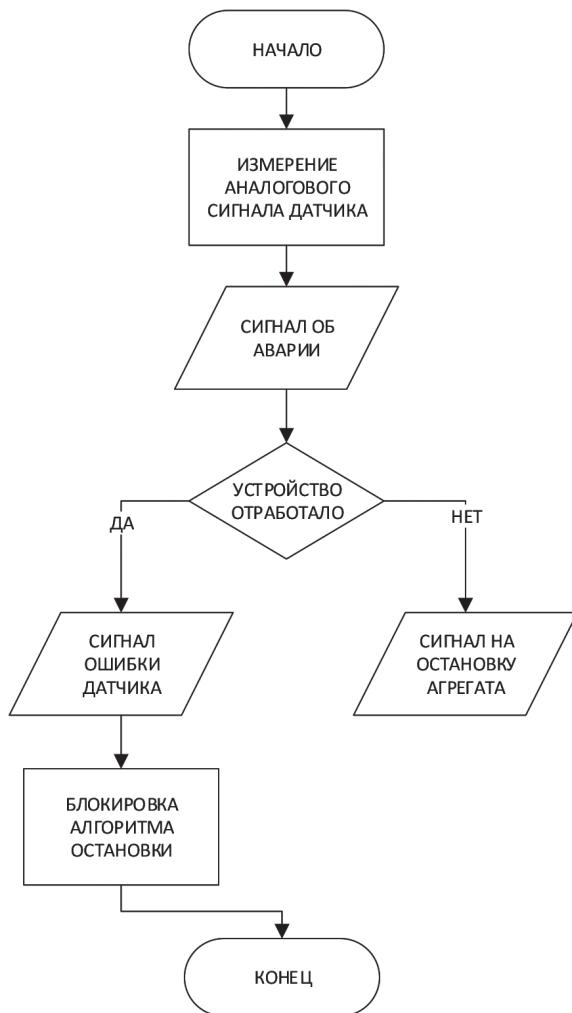


Рис. 7. Алгоритм автоматизированной системы управления для внедрения

Представленный алгоритм может работать параллельно с основной программой. Кроме того, его использование в значительной степени сократит временные затраты персонала на поиск и устранение неисправности в информационно-измерительном канале датчика давления.

Заключение (Conclusion)

В ходе выполнения данной работы был разработан и представлен прототип устройства для предотвращения ложных срабатываний. В рамках исследования в качестве первого этапа был выполнен анализ принципов построения современных автоматизированных систем управления СЭУ. Затем были выявлены основные неисправности информационно-измерительных каналов давления, на которые направлена разработка данного прототипа. Далее были разработаны техни-

ческие и программные составляющие последующего прототипа. В качестве второго этапа был поставлен эксперимент, целью которого являлась проверка работоспособности собранной модели устройства идентификации неисправности средства измерения давления.

Необходимо отметить, что недостатком представленного устройства является невозможность идентификации некоторых неисправностей измерительной техники. С целью внедрения разработанного устройства в СЭУ приведен дополнительный алгоритм работы автоматизированной системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков Д. Е. Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования / Д. Е. Бурков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 893–902. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902. — EDN PTAEFT.
2. Жидков Н. А. Повышение экономической и энергетической эффективности судовых двигателей внутреннего сгорания в условиях ужесточения экологических требований / Н. А. Жидков, О. В. Новикова // Цифровая трансформация экономических систем: проблемы и перспективы (ЭКОПРОМ-2022): сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с зарубежным участием, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2022 года. — Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. — С. 274–277. DOI: 10.18720/IEP/2021.4/80. — EDN SALBXA.
3. Валов Д. С. Системы управления судовыми энергетическими установками автономных судов / Д. С. Валов, С. А. Валгин // Актуальные исследования. — 2023. — № 5(135). — С. 19–28. — EDN QGRTJJ.
4. Коновалов П. О. Опыт развития и применения в эксплуатации систем мониторинга технического состояния судовых ДВС / П. О. Коновалов, А. А. Иванченко, Г. Л. Ларионов // Тенденции развития науки и образования. — 2023. — № 100–5. — С. 102–108. DOI: 10.18411/trnio-08-2023-246. — EDN TWWL BX.
5. Московцев Ю. П. Принципы создания АСУ ТП гражданских судов / Ю. П. Московцев // Системы управления и обработки информации. — 2000. — № 1. — С. 61–68.
6. Корчанов В. М. Системы управления пропульсивной судовой установкой на базе комплекта КСА / В. М. Корчанов, Ю. П. Московцев, Г. П. Орунов // Системы управления и обработки информации. — 2000. — № 1. — С. 61–68.
6. Агеев В. И. Контрольно-измерительные приборы судовых энергетических установок: устройство, эксплуатация, эффективность: справочник / В. И. Агеев. — Ленинград: Судостроение, 1985. — 416 с.
7. Темнов В. Н. Метрологическое исследование объектов контроля / В. Н. Темнов. — СПб: ВМИИ, 2006. — 331 с.
8. Ивановский В. Г. Мониторинг рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации / В. Г. Ивановский, Р. А. Варбанец // Двигатели внутреннего сгорания. — 2004. — № 2. — С. 138–141.
9. Bushuev O. Yu. Detection of changes in the state of a pressure sensor by analyzing the output signal / O. Yu. Bushuev, A. S. Semenov, A. O. Chernavsky, A. L. Shestakov // Proceedings of the XX IMEKO World Congress "Metrology for Green Growth", Busan, Republic of Korea. — September 9–14, 2012 — IMEKO, 2012.
10. Кучеренко В. А. Моделирование системы диагностики датчиков судовых энергетических систем / В. А. Кучеренко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 1. — С. 331–336. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-331-332. — EDN IHTLJB.

REFERENCES

1. Burkov, D. E. "Application of a ship information system for monitoring and controlling the technical condition of ship equipment." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 893–902. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902.
2. Zhidkov, N. A. and O. V. Novikova. "Improving the economic and energy efficiency of marine internal combustion engines under conditions of tightening environmental requirements." *Tsifrovaya transformatsiya ekonomicheskikh sistem: problemy i perspektivy (EKOPROM-2022): sbornik trudov VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 11–12 noyabrya 2022 goda*. Sankt-Peterburg: POLITEKh-PRESS, 2022: 274–277. DOI: 10.18720/IEP/2021.4/80.

3. Valov, D. S. and S. A. Valgin. "Control systems for marine power plants of autonomous ships." *Aktual'nye issledovaniya* 5(135) (2023): 19–28.
4. Konovalov, P. O., A. A. Ivanchenko and G. L. Larionov. "Opyt razvitiya i primeneniya v ekspluatatsii sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh DVS." *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* 100–5 (2023): 102–108. DOI: 10.18411/trnio-08-2023-246.
5. Moskovtsev, Yu. P. "Principles of creating an automated process control system for civil ships ." *Control and information Processing Systems: Scientific And Technical Collection* 1 (2000): 61–68.
6. Korchanov, V. M., Yu. P. Moskovtsev and G. P. Orunov. "Control systems for a ship's propulsion plant based on the ksa set." *Control and information Processing Systems: Scientific And Technical Collection* 1 (2000): 61–68.
7. Ageev, V. I. *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory sudovykh energeticheskikh ustrojstv: ekspluatatsiya, effektivnost'*: spravochnik Leningrad: Sudostroenie, 1985: 416.
8. Temnov, V. N. *Metrologicheskoe issledovanie ob"ektov kontrolyya* SPb: VMII, 2006: 331.
9. Ivanovskiy, V. G. and R. A. Varbanets. "Monitoring rabochego protsessa sudovykh dizeley v ekspluatatsii." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 2 (2004): 138–141.
10. O. Yu. Bushuev et al. "Detection of changes in the state of a pressure sensor by analyzing the output signal." *Proceedings of the XX IMEKO World Congress "Metrology for Green Growth", Busan, Republic of Korea. — September 9–14, 2012.*
11. Kucherenko, V. A. "Modeling of the diagnostic system of sensors of ship power systems." *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* 1 (2024): 331–336. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-331-332.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Житников Александр Андреевич — аспирант
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»
683003, Российская Федерация,
Петропавловск-Камчатский,
ул. Вилюйская, 56/1
e-mail: zhitnikov-alexandr@mail.ru

Марченко Алексей Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»
683003, Российская Федерация,
Петропавловск-Камчатский,
ул. Вилюйская, 56/1
e-mail: Marchenko_Alx@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhitnikov, Aleksandr A. — Postgraduate
Federal State Budgetary Educational Institution of
Higher Education
“Kamchatka State Technical University”
56/1, Vilyuyskaya St., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683003, Russian Federation
e-mail: zhitnikov-alexandr@mail.ru

Marchenko, Aleksey A. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Federal State Budgetary Educational Institution of
Higher Education
“Kamchatka State Technical University”
56/1, Vilyuyskaya St., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683003, Russian Federation
e-mail: Marchenko_Alx@inbox.ru

Статья поступила в редакцию: 29 июля 2025 г.

Received: July. 29, 2025.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-756-767

EDN WBVRTH

MODEL OF AN AUTOMATED PRODUCT QUALITY CONTROL SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORKS WITH UNSUPERVISED AND SEMI-SUPERVISED LEARNING

V. I. Milushkov

Saint Petersburg State University of Economics,
Saint Petersburg, Russian Federation

This paper addresses the problem of automated visual inspection of welded and hull structures in shipbuilding, where product reliability and operational safety critically depend on the timely and accurate detection of defects. Traditional optical inspection is limited by subjective human assessment and poor scalability, while conventional computer vision techniques suffer from data scarcity and variability of industrial environments. To overcome these limitations, an integrated mathematical framework is proposed that combines unsupervised and semi-supervised learning approaches. The architecture includes: (i) a convolutional autoencoder trained on defect-free reference samples for reconstruction-based anomaly detection; (ii) a two-stage sliding-window algorithm with dual thresholds for distinguishing weak defects from background noise under controlled false alarm rates; and (iii) a semi-supervised classification module that integrates contrastive learning with graph-based pseudo-labeling methods (k -NN and label propagation) to leverage large-scale unlabeled datasets. Joint optimization of reconstruction and discriminative representation aligns normality criteria with stable classification boundaries. Experimental validation confirms that the proposed method reliably detects both prominent and subtle defects, minimizes dependence on manual labeling, and can be seamlessly integrated into industrial quality assurance workflows. The main contribution lies in the development of a unified inspection model that fuses reconstruction-based, contrastive, and graph-driven approaches, demonstrating potential for improving reproducibility, reducing labor intensity, and enhancing the reliability of shipbuilding production.

Keywords: convolutional autoencoder, anomaly detection, sliding window, dual-threshold filtering, contrastive learning, semi-supervised classification, graph-based label propagation, shipbuilding, quality control.

For citation:

Milushkov, Vitaliy I. "Model of an automated product quality control system based on neural networks with unsupervised and semi-supervised learning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 756–767. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-756-767.

УДК 004.8

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕЙ С НЕКОНТРОЛИРУЕМЫМ И ЧАСТИЧНО КОНТРОЛИРУЕМЫМ ОБУЧЕНИЕМ

В. И. Милушков

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрена задача автоматизации визуального контроля качества сварных и корпусных конструкций в судостроении, когда надежность продукции и безопасность эксплуатации напрямую зависят от своевременного выявления дефектов. Показано, что традиционный оптический контроль основан на субъективной оценке экспертов и плохо масштабируется, а классические методы компьютерного зре-

ния ограничены дефицитом размеченных данных и высокой вариативностью производственных условий. Для преодоления этих ограничений предложена строгая математическая модель, сочетающая механизмы неконтролируемого и частично контролируемого обучения. Архитектура включает три ключевых компонента: сверточный автоэнкодер, обучаемый на бездефектных эталонных образцах и обеспечивающий реконструктивное выявление аномалий; двухэтапную процедуру со скользящим окном и двумя порогами, позволяющую разделять слабовыраженные дефекты и шумы при контролируемом уровне ложных срабатываний; полуавтоматическую классификацию, основанную на контрастном обучении и графовых алгоритмах псевдоразметки (k -NN и распространение меток), что обеспечивает вовлечение масштабных массивов неразмеченных данных. Совместная оптимизация задач реконструкции и дискриминативного представления признаков позволяет согласовать критерии «нормальности» и устойчивой классификации. Экспериментальный анализ подтверждает, что предложенный подход позволяет выявлять как ярко выраженные, так и малозаметные дефекты, снижает зависимость от ручной аннотации и легко интегрируется в цикл промышленного контроля качества. Научная новизна исследования заключается в разработке комплексной модели автоматизированного контроля качества промышленных изображений, интегрирующей реконструктивные, контрастные и графовые методы. Практическая значимость состоит в возможности применения модели в судостроительном производстве для повышения воспроизводимости процедур контроля, снижения трудозатрат и обеспечения надежности выпускаемой продукции.

Ключевые слова: сверточный автоэнкодер, детектирование аномалий, скользящее окно, двухпороговая фильтрация, контрастное обучение, полуавтоматическая классификация, графовое распространение меток, судостроение, контроль качества.

Для цитирования:

Милушкин В. И. Модель автоматизированной системы контроля качества изделий на основе нейросетей с неконтролируемым и частично контролируемым обучением / В. И. Милушкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 756–767. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-756-767. — EDN WBVRTH.

Введение (Introduction)

Качество сварных соединений и прилегающих поверхностей корпусных элементов судостроительных изделий (далее — контролируемые объекты) напрямую определяет безопасность эксплуатации, сроки и стоимость проектов [1]. Несмотря на наличие аппаратных методов неразрушающего контроля (ультразвукового, рентгенографического и др.) [2–4], визуально-оптическая проверка именно этих объектов по-прежнему во многом выполняется вручную и зависит от субъективной оценки экспертов. Переход к автоматизированному анализу затруднен дефицитом размеченных данных по дефектам контролируемых объектов и низкой частотой появления критически важных дефектов, а также вариативностью материалов, условий съемки и производственных режимов, что снижает устойчивость алгоритмов. В результате стандартные методы компьютерного зрения требуют недоступно больших объемов аннотаций и демонстрируют слабую способность к обобщению [1, 5].

В настоящей работе предлагается строгая математическая модель системы визуального контроля, объединяющая методы обнаружения аномалий на основе реконструкции и полуавтоматической классификации. Базовым компонентом выступает сверточный автоэнкодер (САЭ), обучаемый на бездефектных эталонных образцах. Карта расхождений между входным изображением и его реконструкцией служит источником признаков для выявления потенциальных отклонений. Чтобы повысить чувствительность к слабовыраженным дефектам при контролируемой доле ложных срабатываний, используется двухэтапная пороговая процедура со скользящим окном: локальная агрегация сигналов уменьшает влияние шумов и артефактов съемки, а два согласованно калибруемых порога обеспечивают устойчивое принятие решений.

Для автоматической классификации обнаруженных областей применяется полуавтоматический контур: контрастное обучение формирует инвариантные представления дефектов и фоновых структур, а псевдоразметка на k -NN-графе с распространением меток позволяет последовательно вовлекать большие объемы неаннотированных производственных данных. Важной особенностью является совместная оптимизация задач реконструкции и контрастного обучения в едином функционале качества, что согласует критерии «нормальности» и дискриминативности признаков.

Целью данного исследования является разработка модели автоматизированной системы контроля качества продукции, основанной на методах искусственных нейронных сетей, сочетающих механизмы неконтролируемого и частично контролируемого обучения.

Предложенная модель включает три ключевых компонента:

1) *единую вычислительную архитектуру*, интегрирующую реконструктивное выявление отклонений и контрастивное обучение в общий функционал потерь;

2) *двуихпороговую процедуру с применением скользящего окна*, обеспечивающую высокую чувствительность к слабовыраженным дефектам при сохранении низкого уровня ложноположительных срабатываний;

3) *графовые алгоритмы псевдоразметки* (метод ближайших соседей и алгоритмы распространения меток), позволяющие эффективно задействовать крупные массивы неразмеченных данных в условиях дефицита экспертных аннотаций.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексной модели автоматизированного контроля качества промышленных изображений, интегрирующей реконструктивные, контрастивные и графовые методы. Предложенная модель обеспечивает надежное выявление дефектов различной сложности, повышает эффективность анализа производственных данных при ограниченном объеме размеченных выборок и ориентирована на интеграцию в контур промышленного контроля качества судостроительного производства. Ее применение позволяет существенно сократить потребность в ручной разметке данных, повысить воспроизводимость и масштабируемость процедур контроля. Модель органично встраивается в регламент принятия решений («исправный» / «подозрительный») и соответствует современным практикам MLOps, включая калибровку порогов, ревизию эталонов и мониторинг дрейфа данных [2], [4].

Теоретическая основа модели базируется на совокупности современных математических и вычислительных подходов. В частности, используются методы оптимизации (стохастический градиентный спуск и его модификации), инструменты линейной алгебры (построение k-NN-графов, итерационные матричные алгоритмы), вероятностно-статистические методы (пороговые правила, доверительные интервалы, модели распределений для псевдоразметки), а также алгоритмы глубокого обучения для сверточных сетей и контрастного обучения. Такое сочетание обеспечивает строгую формализацию процедуры контроля и возможность ее воспроизводимой калибровки в условиях реального производственного процесса.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 1 схематически представлена предлагаемая модель контроля качества: 1 — описание исходных данных и формирование обучающей выборки; 2 — обучение сверточного автоэнкодера на эталонных бездефектных изображениях; 3 — построение карты отклонений по разности «оригинал — реконструкция» и первичный анализ аномалий; 4 — двухэтапное детектирование с пороговой фильтрацией и скользящим окном; 5 — полуконтролируемая классификация на основе контрастных представлений и графового распространения меток; 6 — итоговая интеграция результатов детектирования и классификации для вынесения решения. Дальнейшие этапы формализуют каждый шаг, вводят используемые обозначения и функции потерь, а также описывают условия построения моделей.

Для построения моделей необходимо ввести следующие условия:

1. Наличие набора промышленных изображений высокого (или иного) разрешения, в котором выделено подмножество бездефектных образцов, служащих эталонными.

2. Обучение сверточного автоэнкодера (САЭ) производится исключительно на бездефектных образцах, что обеспечивает возможность выявления отклонений при обработке ранее не встречавшихся образцов.

3. Детектирование дефектов осуществляется посредством анализа «карты разностей», полученной сравнением исходного изображения и его реконструкции, выполненной САЭ [6, 7].

4. Для повышения точности и устойчивости детектирования дефектов используется двухэтапная методика со скользящим окном и двумя порогами (τ_1 и τ_2) [5, 8].

5. В задаче полуконтролируемой классификации наряду с аннотированными примерами привлекаются неаннотированные данные, которым при достижении достаточного уровня уверенности присваивается псевдоразметка. Данный механизм реализуется на основе методов контрастного обучения и графового распространения меток [1, 2].

6. Общая функция потерь может включать в себя вклад от задачи реконструкции (САЭ) и вклад от контрастного обучения, что позволяет одновременно усиливать способность модели к обнаружению аномалий и улучшать ее классификацию.



Рис. 1. Архитектура модели визуального контроля качества контролируемых объектов на основе гибридного полуконтролируемого обучения в интеллектуальной системе управления

Исходные данные и обозначения

Множество промышленных изображений. Пусть имеется совокупность M изображений:

$$|X| = |\{x_i\}_{i=1}^M, \quad x_i \in R^{C \times H \times W}.$$

Здесь C — число каналов (например, $C = 1$ для монохромных снимков, либо $C = 3$ для цветных); H и W — высота и ширина изображения.

Подмножество «хороших» образцов для САЭ. Для обучения сверточного автоэнкодера выделяется набор «бездефектных» изображений:

$$|X_{\text{go}}^{(\text{train})}| = |\{x_i\}_{i=1}^N, \quad N \leq M.$$

Предполагается, что автоэнкодер будет ориентироваться на статистику данных без аномалий.

Аннотированные и неаннотированные данные для полуконтролируемого обучения

Аннотированный (размеченный) набор из m примеров:

$$D^{\text{ann}} = \left\{ (x_i^{\text{ann}}, y_i) \right\}_{i=1}^m, \quad y_i \in \{1, \dots, K\}.$$

Здесь y_i может отражать либо классы дефектов, либо бинарную метку «дефект / отсутствие дефекта» (если $K = 2$).

Неаннотированный набор из n примеров:

$$D^{\text{unann}} = \{x_j^{\text{unann}}\}_{j=1}^n.$$

Цель — обучить модель классифицировать / детектировать дефекты, используя как аннотированные, так и неаннотированные данные.

Параметры сети

Пусть θ — совокупность параметров, которыми может быть

$\theta = \{\theta_{enc}, \theta_{dec}\}$ при обучении автоэнкодера;

θ может расширяться при добавлении проекционной головы, классификатора и других модулей в рамках контрастного обучения.

Сверточный автоэнкодер (САЭ) и дифференциальное отображение

Архитектура и функция потерь

Пусть $Enc_{\theta}(x)$ — сверточный кодировщик, отображающий вход x в более компактное векторное (или тензорное) представление, а $Dec_{\theta}(\cdot)$ — декодировщик, пытающийся восстановить исходное изображение. Итоговая модель:

$$\hat{x} = |Dec_{\theta}(Enc_{\theta}(x))|.$$

Автоэнкодер обучается на «хороших» образцах $X_{go}^{(train)}$ с целью минимизировать среднеквадратичную (или иную) ошибку реконструкции:

$$L_{AE}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - \hat{x}_i\|^2; \quad \hat{x}_i = D_{ec_{\theta}}(E_{nc_{\theta}}(x_i)).$$

При качественном обучении автоэнкодер хорошо восстанавливает нормальные структуры без дефектов.

Формирование карты отклонений

На этапе применения для произвольного (возможно, дефектного) изображения x строится восстановление $\hat{x} = Dec_{\theta}(Enc_{\theta}(x))$. Затем вычисляется «карта разностей»:

$$\Delta(x) = |x - \hat{x}|,$$

где $|\cdot|$ — покомпонентное (по пикселям) абсолютное значение. Предполагается, что наличие дефекта сильно повышает $\Delta(x)$ в соответствующих местах.

Двухэтапная методика выявления дефектов со скользящим окном

Первый этап (грубый отбор дефектных изображений). Для повышения устойчивости к шумам вводится операция «скользящего окна» размера $r \times r$, проходящего по карте $\Delta(x)$. Для каждого положения окна W_k определяется средняя яркость (или сумма) пикселей Δ :

$$A(W_k) = \left| \frac{1}{r^2} \sum_{(u,v) \in W_k} \Delta(x)[u,v] \right|.$$

Устанавливается порог τ_1 . Если существует хотя бы одно окно W_k , где $A(W_k) > \tau_1$, то первый этап фиксирует решение «дефект имеется». Если ни в одном положении окна значения не превышают τ_1 , то изображение признается «хорошим», и анализ завершается (второй этап не запускается).

Устанавливаются два порога: τ_1 — порог для грубого отбора изображений с возможными дефектами (используется на первом этапе); τ_2 — более чувствительный порог для уточняющего анализа, применяемый на втором этапе. Если существует хотя бы одно окно w , где $S_w > \tau_1$, то изображение переходит на второй этап анализа. Если по итогам второго этапа хотя бы одно значение S_w превышает порог τ_2 , то изображение классифицируется как дефектное или требующее дальнейшей проверки.

Второй этап (уточнение слабых дефектов и фильтрация шумов). В случае выявления дефекта на первом этапе ($Stage1Decision = 1$) инициируется второй этап обработки, когда могут применяться другие параметры: меньший порог $\tau_2 \leq \tau_1$, иной размер окна либо когда возможна предварительная фильтрация $\Delta(x)$ для подавления шумов.

Итоговая классификация изображения:

$$Decision(x) = Stage1Decision(x) \vee Stage2Decision(x).$$

Если (Stage2Decision=1), то изображение однозначно считается дефектным либо «подозрительным», требующим дальнейшей проверки.

Гибридный полуконтролируемый метод обучения с контрастной функцией потерь

Формирование мультивидовой партии (mini-batch)

Пусть на каждом шаге обучения выбираются m аннотированных изображений $\{(x_i^{ann}, y_i)\}_{i=1}^m$ и n неаннотированных изображений $\{x_j^{unann}\}_{j=1}^n$.

Далее для каждого аннотированного примера

$$x_{aug0}^{ann}, x_{aug1}^{ann} \quad (\text{две сильные аугментации}),$$

а для каждого неаннотированного —

$$x_{aug0}^{unann} \quad (\text{сильная аугментация}), \quad x_{waug1}^{unann} \quad (\text{слабая аугментация}).$$

Итого формируется набор $2m + 2n$ аугментированных образцов. Прогнав их через кодировщик Enc_θ , получим векторные представления:

$$Z = \{z_{aug0}^{ann}, z_{aug1}^{ann}, z_{aug0}^{unann}, z_{waug1}^{unann}\}.$$

Механизм псевдоразметки с порогом уверенности

Выполнение инференса (прогнозирования) для неразмеченных образцов. Обозначим $\text{infer}(z)$ — процедуру, которая возвращает

$$y_{\text{prob}}, y_{\text{pred}} = \text{infer}(z_{waug1}^{unann}),$$

где y_{prob} — вектор вероятностей по классам, $y_{\text{pred}} = \arg \max(y_{\text{prob}})$ — способ реализации $\text{infer}(\cdot)$

Графовое распространение меток (Label Propagation) k-NN с подсчетом частот соседей
Другой классификатор (при условии, если он уже достаточно обучен).

Порог доверия (conf_thresh). Если $\max(y_{\text{prob}}) > \text{conf_thresh}$, то изображение признается «уверенно» классифицированным и его добавляют к текущей выборке как псевдоразмеченное. Пусть I_{idx} — индексный набор таких неаннотированных образцов.

Индексный набор для контрастного обучения. Общее множество «полезных» индексов:

$$I_p = \{1, 2, \dots, 2m\} \cup |I_{idx}|.$$

Здесь $\{1, \dots, 2m\}$ соответствуют аннотированным изображениям (по два аугментированных варианта на каждое), I_{idx} — уверенно псевдоразмеченные неаннотированные.

Контрастная функция потерь

Контрастное обучение (на основе InfoNCE и его модификаций) формулируется как задача минимизации следующего функционала [7, 9, 10]:

$$L^{sup}(\theta) = \sum_{i \in I_p} \frac{-1}{|P(i)|} \sum_{p \in P(i)} \log \frac{\exp\left(\frac{z_i \cdot z_p}{\tau}\right)}{\sum_{a \in A(i)} \exp\left(\frac{z_i \cdot z_a}{\tau}\right)},$$

где $P(i)$ — множество «положительных» индексов для z_i (аугментации того же исходного изображения или того же класса, с учетом аннотации / псевдоаннотации);

$A(i)$ — множество всех индексов в батче, кроме z_i ;

τ — «температурный» параметр (обычно 0,1–0,5).

Вследствие применения контрастной функции потерь происходит сближение векторов признаков, относящихся к одному классу (положительные пары), в пространстве эмбеддингов, тогда

как векторы признаков различных классов (отрицательные пары) демонстрируют дивергентное поведение, увеличивая межклассовое расстояние.

Графовое распространение меток (Label Propagation)

Формирование (конструирование) графа на основе k -ближайших соседей (k -NN-графа)

Пусть имеются опорный (support) набор $S = \{z_i\}_{i=1}^{L_s}$ с известными метками y_i и запросный (query) набор $Q = \{z_j\}_{j=L_s+1}^{L_s+L_q}$.

Объединим все векторы в единый массив: $Z = \{z_1, \dots, z_T\}$, $|T = L_s + L_q|$.

Строится k -ближайший соседний граф, задаваемый матрицей $A \in R^{T \times T}$:

$$A_{ij} = \begin{cases} \text{sim}(z_i, z_j), & z_j \in KNN(z_i) \text{ и } i \neq j, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

где $\text{sim}(\cdot, \cdot)$ может быть скалярным произведением $z_i^\top z_j$ (при нормированных векторах это эквивалент косинусного сходства) с добавкой $\gamma > 1$ для усиления связи.

Для обеспечения симметризации и нормировки матрицы весов применяется приведенная последовательность операций:

$$W = \frac{1}{2}(A + A^\top), \quad D = \text{diag}(W \mathbf{1}_T), \quad W \leftarrow D^{-1/2} W D^{-1/2},$$

где D — диагональная матрица степеней вершин.

Итеративная процедура распространения меток (Label Propagation)

Определим матрицу меток $Y \in R^{T \times K}$:

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \leq L_s \text{ и } y_i = k; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Зададим $\alpha \in (0, 1)$. Изначально $P^*(0) = Y$. Итеративно

$$P^*(\text{iter} + 1) = \alpha W P^*(\text{iter}) + (1 - \alpha) Y.$$

При $\text{iter} \rightarrow \infty$ находим

$$P = (I - \alpha W)^{-1} (1 - \alpha) Y.$$

Каждая строка P есть распределение вероятностей для соответствующего вектора. Последние L_q строк относятся к неаннотированным образцам (запросному набору Q).

Таким образом, получаем $y_{\text{prob}}, y_{\text{pred}} = \arg \max_k P_{\cdot, k}$ для неаннотированных векторов, что и используется при псевдоразметке.

Итоговое обучение и интеграция в общую модель

Обучение САЭ:

$$\min_{\theta} L_{\text{AE}}(\theta), \quad L_{\text{AE}}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - \text{Dec}_{\theta}(\text{Enc}_{\theta}(x_i))\|^2.$$

Модель усваивает структуру «бездефектных» данных. Для каждого изображения x строится реконструкция автоэнкодера, после чего вычисляется разностная карта $\Delta(x) = |x - \text{Dec}_{\theta}(\text{Enc}_{\theta}(x))|$. На ее основе применяется двухэтапная процедура со скользящим окном $r \times r$ и порогами τ_1, τ_2 , что позволяет принять итоговое бинарное решение $\text{Decision}(x)$ о принадлежности объекта к классу «исправный» или «дефектный».

Классификация дефектов выполняется в полуконтролируемой постановке и опирается на контрастный функционал потерь совместно с механизмами псевдоразметки. Для этого формируются мультивидовые партии, включающие m аннотированных и n неаннотированных изображений. К ним применяются сильные и слабые аугментации, после чего для неаннотированных образцов

выполняется псевдоразметка на основе k -NN или графового распространения меток (Label Propagation) при условии превышения доверительного порога $conf_thresh$. Контрастная функция L^{sup} оптимизируется по индексам из множества $I_p = \{1, \dots, 2m\} \cup I_{idx}$, а параметры модели θ (кодировщика, проектора и / или классификатора) обновляются для улучшения эмбеддингового пространства.

Совместная минимизация функционала потерь

Рассматривается вариант, при котором результирующая функция потерь представляет собой совокупность двух составляющих: ошибки реконструкции и критерия контрастного обучения:

$$L_{total}(\theta) = \lambda_{AE} L_{AE}(\theta) + \lambda_{CTR} L^{sup}(\theta),$$

где $\lambda_{AE}, \lambda_{CTR} > 0$.

Это позволяет одновременно повышать способность модели к обнаружению аномалий (благодаря автоэнкодеру) и улучшать классификацию благодаря контрастному обучению.

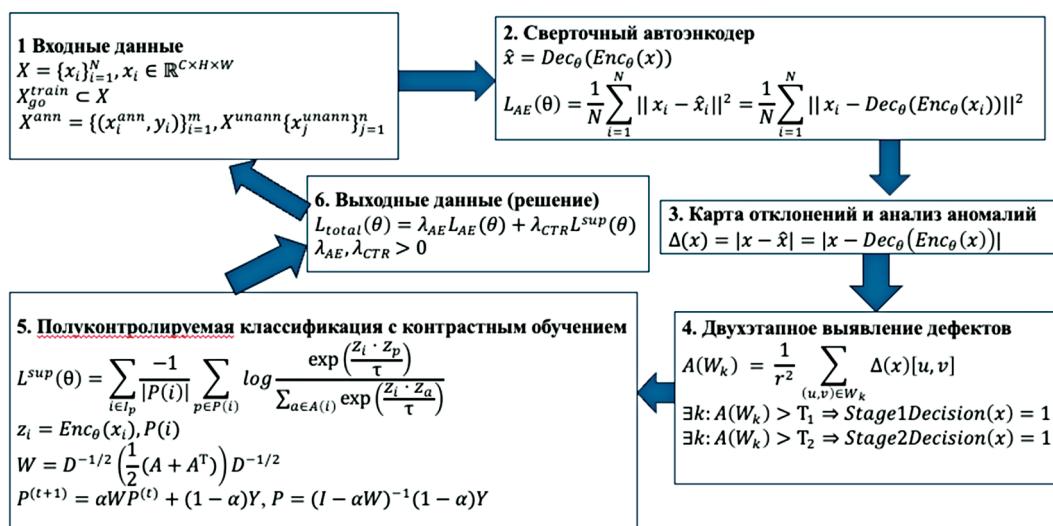


Рис. 2. Модель визуального контроля качества контролируемых объектов на основе гибридного полуконтролируемого обучения в интеллектуальной системе управления

Как показано на рис. 2, предложенный конвейер состоит из шести взаимосвязанных модулей:

1) подготовка данных и разбиение на эталонные аннотированные и неаннотированные подмножества;

2) обучение сверточного автоэнкодера на бездефектных снимках с минимизацией L_{AE} ;

3) построение карты отклонений $\Delta(x) = |x - \hat{x}|$ для первичного выявления аномалий;

4) двухэтапное детектирование по средним значениям в скользящем окне $r \times r$ с порогами τ_1 и τ_2 ;

5) полуконтролируемая классификация на основе контрастной функции L^{sup} и распространения меток на графе;

6) интеграция результатов с итоговой функцией $L_{total} = \lambda_{AE} L_{AE} + \lambda_{CTR} L^{sup}$.

Направление потоков данных и расчетных величин (см. стрелки и формулы в блоках на рис. 2) отражает переход от реконструкции и анализа аномалий к уточняющей классификации и финальному решению, обеспечивая одновременное повышение чувствительности к дефектам и устойчивости классификации.

Обсуждение (Discussion)

Предложенная модель объединяет реконструктивное детектирование аномалий и полуконтролируемую классификацию в едином конвейере для задач промышленного контроля качества,

характерных для судостроения. Обучение сверточного САЭ только на эталонных данных делает модель чувствительной к отклонениям структуры изображения; разностная карта $\Delta(x) = |x - \hat{x}|$ служит универсальным индикатором дефекта независимо от его морфологии. Двухэтапная процедура со скользящим окном $r \times r$ и порогами τ_1 / τ_2 помогает разделить задачи «грубой фильтрации» и «уточнения», снижая ложные срабатывания при сохранении чувствительности к слабо выраженным дефектам (тонкие трещины, пористость, локальные включения).

Интеграция контрастного обучения (L^{sup}) с механизмом псевдоразметки по k -NN/Label Propagation позволяет использовать масштабные неаннотированные массивы без линейного роста затрат на ручную разметку. Сближение эмбеддингов одного класса и разведение межклассовых расстояний стабилизирует последующую классификацию, а доверительный порог conf_thresh ограничивает влияние ошибочных псевдометок. Совместная оптимизация $L_{\text{total}}(\theta) = \lambda_{\text{AE}} \cdot L_{\text{AE}} + \lambda_{\text{CTR}} \cdot L^{\text{sup}}$ обеспечивает баланс между способностью «видеть» аномалии и устойчивостью финального решения [6, 8, 10].

С практической точки зрения для судостроительных производств важны три свойства предложенного подхода [2], [3]:

1. *Воспроизводимость и масштабируемость.* САЭ обучается на небольшом, тщательно сформированном эталонном наборе; дальнейшее расширение охвата достигается за счет неразмеченных данных и графового распространения меток, что хорошо согласуется с вариативными условиями съемки и редкостью критичных дефектов.

2. *Устойчивость к шумам.* Усреднение по окну и разнесение порогов снижают чувствительность к локальным артефактам съемки (блики, шум датчика) без ухудшения обнаружения протяженных или малоконтрастных дефектов [5, 11].

3. *Интеграция в цикл контроля.* Бинарное решение $\text{Decision}(x)$ обеспечивает возможность интеграции в технологический регламент: «исправный» → пропуск; «подозрительный / дефектный» → маршрутизация на экспертную проверку или повторную съемку.

Вместе с тем имеются следующие ограничения и аспекты, требующие дальнейшей доработки:

Подбор порогов и размера окна. Значения τ_1 , τ_2 и r зависят от класса контролируемых объектов, оптики и разрешения. Недонастройка приводит либо к росту ложных тревог, либо к пропуску слабых дефектов. Практически оправдана калибровка по доверительным кривым (ROC/PR) на небольшом валидационном подмножестве.

Смещение «эталона». Если в «бездефектном» наборе присутствуют систематические артефакты, САЭ начнет их реконструировать, что снизит контраст $\Delta(x)$. Это требует периодической санитарной очистки эталонного пула и мониторинга распределений ошибок реконструкции.

Зависимость псевдоразметки от топологии графа. Количество ближайших соседей k , метрика сходства и параметр α в Label Propagation влияют на стабильность y_{prob} . Чрезмерно плотные графы могут усиливать «эффект эха» (распространение неверной метки), слишком разреженные — приводить к фрагментации классов.

Вариативность аугментаций. Дисбаланс между «сильными» и «слабыми» аугментациями в мультивидовой выборке способен ухудшить консистентность эмбеддингов, поэтому полезен отбор аугментаций, инвариантных к реальным технологическим вариациям (изменение освещения, небольшие сдвиги/повороты, зернистость).

Вычислительная стоимость. Построение k -NN-графа на больших пулах и итерации распространения меток требуют оптимизаций (пакетная обработка, приближенный NN- поиск, периодическая, а не непрерывная перепривязка псевдометок) [12].

Методологически важно планировать аблационные исследования: (i) только САЭ; (ii) САЭ + двухпороговая фильтрация; (iii) добавление контрастного обучения; (iv) добавление графовой псевдоразметки. Это позволит количественно оценить вклад каждого компонента и подобрать $\lambda_{\text{AE}} / \lambda_{\text{CTR}}$. Для внедрения на площадке целесообразно вести MLOps-практики: контроль дрейфа данных, периодическую перекалибровку порогов, «черные списки» кадров с нетипичными артефактами, верификацию эталонного пула [13–16].

Заключение (Conclusion)

В работе предложена модель автоматизированной системы контроля качества контролируемых объектов для судостроительного производства, основанная на сочетании механизмов неконтролируемого и частично контролируемого обучения. Архитектура объединяет сверточный автоэнкодер для реконструктивного выявления аномалий, двухэтапную процедуру детектирования со скользящим окном и порогами различной чувствительности, а также полуконтролируемую классификацию с применением контрастного обучения и графовых алгоритмов псевдоразметки.

Проведенный анализ показывает, что предложенный подход имеет ряд существенных преимуществ:

- обеспечивает надежное выявление как ярко выраженных, так и слабых дефектов при контролируемом уровне ложных срабатываний;
- позволяет эффективно задействовать масштабные массивы неразмеченных данных, снижая зависимость от дефицитной экспертной аннотации;
- может быть интегрирован в производственные процессы поддержки принятия решений и соответствует современным практикам управления жизненным циклом моделей машинного обучения (MLOps).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милушкин В. И. Интеграция гибридного полуконтролируемого и контрастного обучения для автоматической классификации дефектов в производственных данных: повышение точности контроля качества продукции / В. И. Милушкин, Н. Н. Лиманский, В. Е. Марлей // Перспективы науки. — 2024. — № 6(177). — С. 81–86. — EDN FBGAFM.
2. Стебаков И. Н. Интеллектуальная диагностика неисправностей роторных систем / И. Н. Стебаков, А. В. Корнаев, Е. П. Корнаева // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век : Материалы XIX международной научно-практической конференции, Орёл, 10–12 ноября 2021 года / Под редакцией А. Н. Качанова, Ю. С. Степанова. — Орёл: Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 2021. — С. 100–105. — EDN HBWIFY.
3. Щетинин Е. Ю. Автоматическое обнаружение аномалий в электрокардиограммах методами генеративного машинного обучения / Е. Ю. Щетинин // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2022. — Т. 19. — № 6(216). — С. 51–59. DOI: 10.14489/vkit.2022.06.pp.051-059. — EDN ERIQHNA.
4. Бирюлин К. Г. Методы обучения нейронных сетей / К. Г. Бирюлин // Современное профессиональное образование: опыт, проблемы, перспективы : Материалы VIII Международной научно-практической конференции. В 2-х ч., Ростов-на-Дону, 22 марта 2021 года. Том Часть 1. — Ростов-на-Дону: Южный университет (ИУБиП) «Издательство ВВМ», 2021. — С. 53–56. — EDN CYSHGL.
5. Мухачев П. А. Современные методы машинного обучения для анализа технического состояния космических аппаратов по данным телеметрической информации / П. А. Мухачев, Т. Р. Садретдинов, Д. А. Притыкин [и др.] // Автоматика и телемеханика. — 2021. — № 8. — С. 3–38. DOI: 10.31857/S0005231021080018. — EDN QNLLZZ.
6. Милушкин В. И. Применение методов автоматического обнаружения аномалий в автоматизированном промышленном контроле изображений: возможности и перспективы / В. И. Милушкин // Актуальные решения проблем водного транспорта : сборник материалов III Международной научно-практической конференции., Астрахань, 29–31 мая 2024 года. — Астрахань: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. — С. 85–88. — EDN XLELVP.
7. Милушкин В. И. Обзор применения методов полуавтоматического и неуправляемого обучения для повышения эффективности автоматического промышленного контроля изображений / В. И. Милушкин // 74-я Международная студенческая научно-техническая конференция : Материалы, Астрахань, 08–13 апреля 2024 года. — Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2024. — С. 597–598. — EDN NYEBIR.
8. Цыба Е. Н. Опыт применения автоэнкодеров при решении задач обнаружения аномалий во временных рядах измерительной информации / Е. Н. Цыба, О. А. Волкова, Н. А. Вострухов // Альманах современной метрологии. — 2024. — № 2(38). — С. 150–160. — EDN KITLEM.

9. He K. Momentum Contrast for Unsupervised Visual Representation Learning / K. He, H. Fan, Y. Wu, S. Xie, R. Girshick // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2020.
10. He K. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2016.
11. Hinton G. E. A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets / G. E. Hinton, S. Osindero, Y-W. Teh // Neural Computation. — 2006. — Vol. 18. — Is. 7. — Pp. 1527–1554. DOI: 10.1162/neco.2006.18.7.1527.
12. Hu G. Unsupervised fabric defect detection based on a deep convolutional generative adversarial network / G. Hu, J. Huang, Q. Wang, J. Li, Z. Xu, X. Huang // Textile Research Journal. — 2020. — Vol. 90. — Is. 3–4. — Pp. 247–270. DOI: 10.1177/0040517519862880.
13. Tan Y. An Encoder-Decoder Based Approach for Anomaly Detection with Application in Additive Manufacturing / Y. Tan, B. Jin, A. Nettekoven, Y. Chen, Y. Yue, U. Topcu, A. Sangiovanni-Vincentelli // 2019 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA) — 2019. — C. 1008–1015. DOI: 10.1109/ICMLA.2019.00171.
14. Oh S. Automatic Detection of Welding Defects Using Faster R-CNN / S. Oh, M. Jung, C. Lim, S. Shin // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10. — Is. 23. DOI: 10.3390/app10238629.
15. Wan Y. Semi-Supervised Defect Detection Method with Data-Expanding Strategy for PCB Quality Inspection / Y. Wan, L. Gao, X. Li, Y. Gao // Sensors. — 2022. — Vol. 22. — Is. 20. DOI: 10.3390/s22207971.
16. Wang X. A new method for deep learning detection of defects in X-ray images of pressure vessel welds / X. Wang, F. He, X. Huang // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 6312.

REFERENCES

1. Milushkov, V. I., N. N. Limanskiy and V. E. Marley. “Integrating hybrid semi-supervised and contrastive learning for automatic defect classification in manufacturing data: Improving product quality control accuracy.” *Science Prospects* 6(177) (2024): 81–86.
2. Stebakov, I. N., A. V. Kornaev and E. P. Kornaeva. “Intelligent diagnostics of rotary systems failures.” *Energo — i resursosberezenie — XXI vek: Materialy XIX mezdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Oryol, 10–12 noyabrya 2021 goda / Pod redakcijej A. N. Kachanova, Y.U.S. Stepanova*. Orel: Orlovskiy gosudarstvennyy universitet imeni I. S. Turgeneva, 2021: 100–105.
3. Schetinin, E. Yu. “On automatic detection of anomalies in electrocardiogramms with generative machine learning.” *Vestnik Komp'juternykh i informatsionnykh Tekhnologii* 19.6(216) (2022): 51–59. DOI: 10.14489/vkit.2022.06.pp.051-059.
4. Biryulin, K. G. “Neural network training methods.” *Sovremennoe professional'noe obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy: Materialy VIII Mezdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh chastyakh, Rostov-na-Donu, 22 marta 2021 goda. Tom Chast' 1*. Rostov-na-Donu: Yuzhnyy universitet (IUBiP) “Izdatel'stvo VVM”, 2021: 53–56.
5. Mukhachev, P. A., T. R. Sadretdinov et al. “Modern machine learning methods for telemetry-based spacecraft health monitoring.” *Avtomatika i Telemehanika* 8 (2021): 3–38. DOI: 10.31857/S0005231021080018.
6. Milushkov, V. I. “Application of automatic anomaly detection methods in automated industrial image inspection: opportunities and perspectives.” *Aktual'nye resheniya problem vodnogo transporta: sbornik materialov III Mezdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Astrakhan', 29–31 maya 2024 goda. Astrakhan': Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta*, 2024: 85–88.
7. Milushkov, V. I. “Obzor primeneniya metodov poluavtomaticheskogo i neupravlyayemogo obucheniya dlya povysheniya effektivnosti avtomaticheskogo promyshlennogo kontrolya izobrazheniy.” *74-ya Mezdunarodnaya studentcheskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: Materialy, Astrakhan', 08–13 aprelya 2024 goda. Astrakhan': Astrakhanskij gosudarstvennyy tehnicheskiy universitet*, 2024: 597–598.
8. Tsyba, E. N., O. A. Volkova and N. A. Vostrukhov. “Experience of using autoencoders in solving problems of detecting anomalies in time series of measurement information.” *Al' Manac of Modern Metrology* 2(38) (2024): 150–160.
9. He, K., R. Girshick, et al. “Momentum Contrast for Unsupervised Visual Representation Learning.” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)2020*.
10. He, K., X. Zhang, S. Ren and J. Sun. “Deep Residual Learning for Image Recognition.” *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)2016*.
11. Hinton, G. E., S. Osindero and Y-W. Teh. “A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets.” *Neural Computation* 18.7 (2006): 1527–1554. DOI: 10.1162/neco.2006.18.7.1527.
12. Hu, G., X. Huang, et al. “Unsupervised fabric defect detection based on a deep convolutional generative adversarial network.” *Textile Research Journal* 90.3–4 (2020): 247–270. DOI: 10.1177/0040517519862880.

13. Tan, Y., A. Sangiovanni-Vincentelli, et al. “An Encoder-Decoder Based Approach for Anomaly Detection with Application in Additive Manufacturing.” *2019 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA)* — 2019: 1008–1015. DOI: 10.1109/ICMLA.2019.00171.
14. Oh, S., M. Jung, C. Lim and S. Shin. “Automatic Detection of Welding Defects Using Faster R-CNN.” *Applied Sciences* 10.23 (2020). DOI: 10.3390/app10238629.
15. Wan, Y., L. Gao, X. Li and Y. Gao. “Semi-Supervised Defect Detection Method with Data-Expanding Strategy for PCB Quality Inspection.” *Sensors* 22.20 (2022). DOI: 10.3390/s22207971.
16. Wang, X., F. He and X. Huang. “A new method for deep learning detection of defects in X-ray images of pressure vessel welds.” *Scientific Reports* 14.1 (2024): 6312.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Милушков Виталий Игоревич — ассистент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный экономический университет»
191023, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30–32
e-mail: vitaliy@milushkoff.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Milushkov, Vitaliy I. — Assistant Lecturer
Saint Petersburg State
University of Economics
30–32 Griboedov Canal Emb., St. Petersburg, 191023,
Russian Federation
e-mail: vitaliy@milushkoff.ru

Статья поступила в редакцию: 04 августа 2025 г.

Received: Aug. 4, 2025.

ANOMALY DETECTION MODEL BASED ON UNSUPERVISED LEARNING FOR MULTIVARIATE INDUSTRIAL TIME SERIES

N. N. Limansky

Saint Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russian Federation

This study focuses on developing an unsupervised anomaly detection model for multivariate time series generated by complex Cyber-Physical Systems (CPS) in shipbuilding and manufacturing enterprises, where strong inter-channel dependencies and regime drifts reduce the sensitivity of traditional Statistical Process Control (SPC) methods. The objective is to design a mathematically grounded model capable of detecting abnormal system behavior under varying operational conditions. The proposed approach includes: (1) representing system states through signature matrices that capture pairwise dependencies among process parameters; (2) reconstructing normal operational patterns using a Long Short-Term Memory (LSTM) neural network and its convolutional variant, Convolutional LSTM (ConvLSTM); (3) applying adaptive thresholds derived from the quantile rule and the Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) method to account for process drift; and (4) localizing anomaly sources using residual maps and linking them to the control loop for interpretability. The model ensures scale invariance, sensitivity to cross-channel correlations, and robustness to regime shifts. Its practical application lies in real-time monitoring and early detection of deviations in ship power plants, cooling and fuel systems, and various stages of shipbuilding production, thereby reducing false alarms and providing interpretable diagnostics for operators.

Keywords: anomaly detection, process control, multivariate time series, feature matrix, neural model, encoder-decoder, adaptive threshold, residual error, quality control, feedback loop, cyber-physical system, unsupervised learning.

For citation:

Limansky, Nikolay N. "Anomaly detection model based on unsupervised learning for multivariate industrial time series." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 768–778. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-768-778.

УДК: 004.8

МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Н. Н. Лиманский

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование процесса роста сложности киберфизических производственных систем (Cyber-Physical Systems) на судостроительных и судоремонтных заводах, который приводит к генерации многомерных временных рядов с сильными межканальными связями и «дрейфом» режимов, когда традиционные методы статистического контроля процессов (Statistical Process Control) теряют чувствительность. Целью исследования является разработка математически определенной модели обнаружения аномалий на основе обучения без учителя (Unsupervised Learning). Задачами исследования являются формализация представления состояния через сигнатуры матрицы, фиксирующие попарные зависимости между параметрами; реконструкция нормального поведения с помощью нейронной сети Long Short-Term Memory (сеть с долгой краткосрочной памятью) и ее сверточной модификации Convolutional Long Short-Term Memory; использование аддитивных порогов на основе квантильного правила и метода Exponentially Weighted Moving Average (экспоненциально взвешенное скользящее среднее) для учета дрейфа; локализация источников аномалий по остаточным картам и сопряжение с контуром управления. Модель обеспечивает масштабную инвариантность, чувствительность к межканальным

зависимостям и устойчивость к режимным смещениям. Практическая значимость выполненного исследования заключается в мониторинге технологических процессов на этапах судостроительного производства, таких как сварка корпусов, сборка секций, испытания энергетических и вспомогательных систем, что снижает количество ложных тревог и обеспечивает оператору интерпретируемые причины срабатывания.

Ключевые слова: аномалия, управление процессом, временной ряд, матрица признаков, нейронная модель, кодировщик-декодировщик, адаптивный порог, остаточная ошибка, контроль качества, обратная связь, киберфизическая система, обучение без учителя.

Для цитирования:

Лиманский Н. Н. Модель обнаружения аномалий на основе обучения без учителя для многомерных временных рядов технологических параметров промышленных объектов / Н. Н. Лиманский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 768–778. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-768-778. — EDN WDIPTC.

Введение (Introduction)

Цифровизация производства и переход к киберфизическим системам *Cyber-Physical Systems* (CPS) сопровождаются ростом объема данных о технологических процессах в форме многомерных временных рядов, в которых параметры тесно взаимосвязаны и подвержены нелинейным изменениям. Поскольку для судостроительной отрасли исследование этих вопросов является особенно актуальным при изготовлении, производстве и испытаниях энергетических установок, систем охлаждения и топливоподачи, возникает необходимость в применении методов, устойчивых к дрейфу режимов и скрытым группам отклонений [1, 2].

Классические методы статистического контроля процессов *Statistical Process Control* (SPC), включая карты Шухарта и процедуры *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA), сохраняют ценность для фиксации крупных сдвигов, но малоэффективны при обнаружении слабых и постепенных аномалий. [3] Современные методы на основе нейронных сетей повышают чувствительность, однако часто ограничиваются анализом отдельных сигналов, неявно учитывают межканальные зависимости и, как правило, требуют размеченных выборок, которые в промышленности получить трудно [4].

Предлагаемый подход реализует совокупность принципиальных механизмов, которые в существующих решениях, как правило, применяются разрозненно:

- явное кодирование межканальных связей через многомасштабные сигнатурные матрицы;
- реконструкция нормального поведения с помощью ConvLSTM-автоэнкодера, учитывающего пространственно-временную структуру сигналов;
- адаптивная пороговая обработка (квантильная и EWMA), снижающая чувствительность к режимным дрейфам и случайным всплескам;
- интерфейс с контуром управления, позволяющий трансформировать диагностический сигнал в корректирующее воздействие [5].

Таким образом, в отличие от аналогов, модель не только фиксирует аномалии без учителя, но и объясняет их источник, сохраняя устойчивость к нестационарности и обеспечивая практическую интеграцию в системы управления.

Целью исследования является разработка и обоснование модели обнаружения аномалий на основе обучения без учителя, которая объединяет сигнатурные матрицы, ConvLSTM-автоэнкодер, адаптивные пороговые правила и сопряжение с управлением, обеспечивая интерпретируемость, масштабируемость и возможность внедрения в автоматические системы управления технологическими процессами судостроительных предприятий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общая архитектура предложенного метода представлена на рис. 1. Схема отражает ключевые этапы обработки данных, анализа и принятия решений в задаче детектирования аномалий во временных рядах.

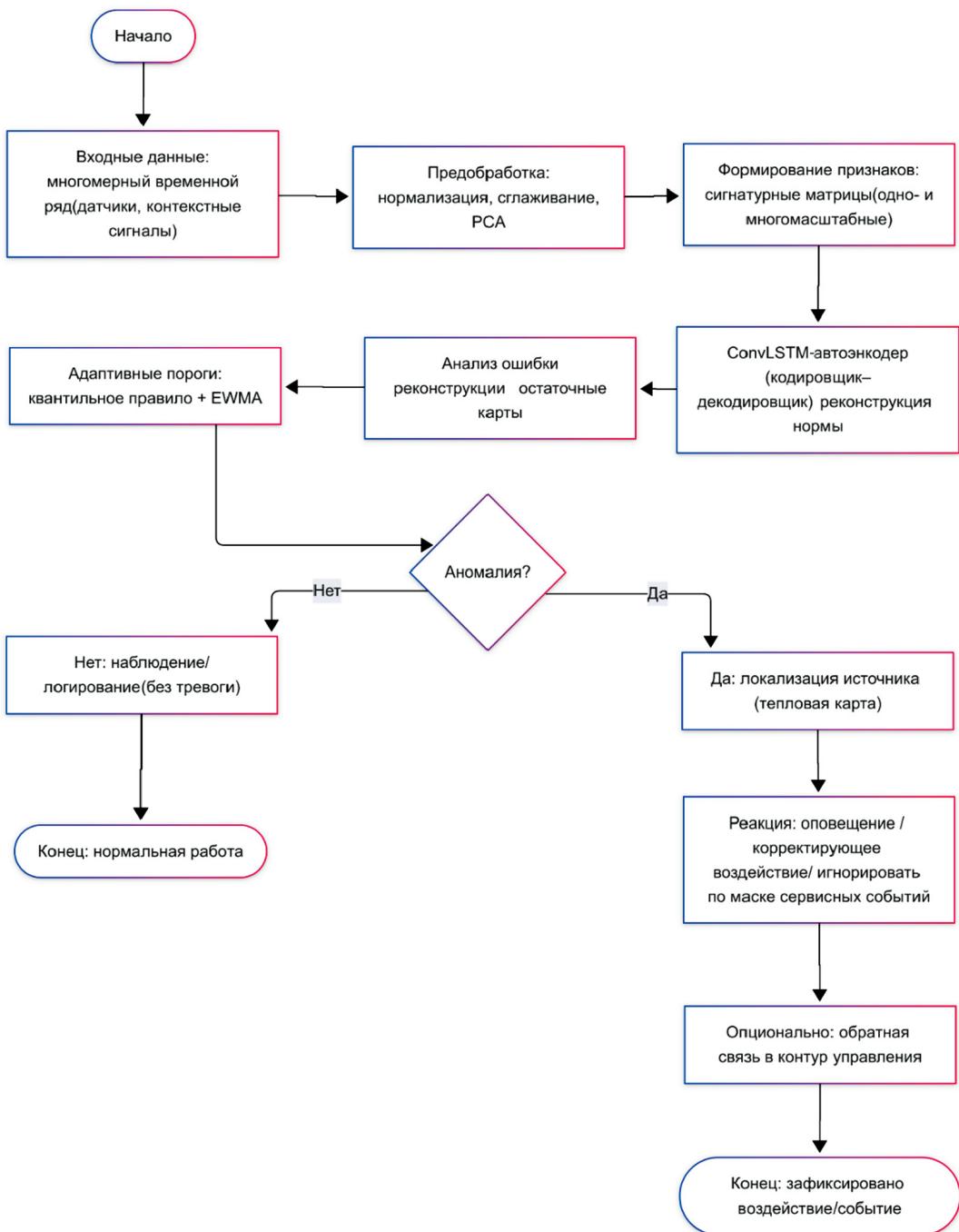


Рис. 1. Архитектура модели обнаружения аномалий

Рассмотрим кратко и последовательно все этапы.

Входные данные (скользящее окно, нормализация, сглаживание, PCA). Входные данные представляют собой многомерный временной ряд:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_d(t)\} \in R^d,$$

770

где $X(t)$ — вектор измерений в момент времени t (потоки датчиков и при необходимости контекстные сигналы).

Предобработка данных

Для учета динамики ряд разбивается на перекрывающиеся окна длиной s со сдвигом h :

$$W_t = [X(t-s+1), \dots, X(t)] \in R^{(s \times n)}. \quad (1)$$

Параметры s и h согласуются с характерными временными масштабами процесса: большие s повышают устойчивость оценки межканальных связей ценой задержки; малые h увеличивают временное разрешение и вычислительную нагрузку.

Перед построением признаков выполняется поканальная нормализация (min-max или z -оценка) и при необходимости подавление высокочастотного шума экспоненциальным сглаживанием:

$$\overline{x_t^{(i)}} = \alpha x_t^{(i)} + (1 - \alpha) \overline{x_{t-1}^{(i)}}, \quad \alpha \in (0, 1). \quad (2)$$

Нормализация устраниет масштабные доминирования, а сглаживание формирует краткую «память» о последних наблюдениях и стабилизирует последующее обучение.

При очень больших n и выраженной мультиколлинеарности признаков целесообразно выполнить сжатие признакового пространства методом главных компонент (PCA). Предварительно данные по признакам центрируются, и при необходимости — стандартизируются.

Пусть $X \in R^{N \times n}$ — матрица наблюдений (по времени или по окнам), а X_c — центрированная версия X . Ковариационная матрица $S = \frac{1}{N-1} X_c^\top X_c \in R^{n \times n}$ разлагается по собственным векторам: $Sw_i = \lambda_i w_i$, $i = 1, \dots, n$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$.

Собираем матрицу главных направлений $W_m = [w_1, \dots, w_m] \in R^{n \times m}$ и получаем сжатое представление в пространстве главных компонент $\tilde{X} = X_c W_m \in R^{N \times m}$. Число компонент m выбирают по доле объясненной дисперсии:

$$\rho(m) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \geq \eta, \quad \eta \in (0, 1)$$

либо по правилу «сломленной палки» (Broken Stick). Применение PCA уменьшает размер входа и ускоряет расчеты, сохраняя основную вариативность признаков.

Формирование признаков

Для каждого окна $W_t \in R^{s \times n}$ формируем сигнатурную матрицу (матрицу признаков) $\Phi_t \in R^{d \times d}$, где $d = n$ или $d = n + p$ при добавлении p контекстных переменных (уставки, возмущения, режимы).

Обозначим нормированные (и при необходимости — сглаженные) сигналы как $\widetilde{x_t^{(i)}}$, а вектор окна для i -го канала: $\widetilde{x_t^{(i)}}$, $\widetilde{x_t^{(i)}} = \left(\widetilde{x_{t-s+1}^{(i)}}, \dots, \widetilde{x_t^{(i)}} \right)^\top \in R^s$. Тогда элементы Φ_t определяются косинусной мерой сходства между траекториями каналов на окне:

$$\Phi_{t,ij} = \frac{\widetilde{x_t^{(i)}}^\top \widetilde{x_t^{(j)}}}{\left\| \widetilde{x_t^{(i)}} \right\|_2 \left\| \widetilde{x_t^{(j)}} \right\|_2}, \quad i, j = 1, \dots, d. \quad (3)$$

Свойства представления $\Phi_t = \Phi_t^\top$, $\Phi_{t,ii} = 1$, $|\Phi_{t,ij}| \leq 1$. Такое представление делает явными межканальные связи, является масштабно инвариантным нормирование устраниет влияние единиц измерения) и более устойчивым к одиночным выбросам, чем поканальный анализ уровней.

Для того, чтобы учитывать быстрые и медленные паттерны, формируется набор многомасштабных сигнатурных матриц $\{\Phi_t^{(1)}\}_{1=1}^L$, вычисленных на окнах разной длины $\{S_1\}_{1=1}^L$. Эти матрицы укладываются по «канальному» измерению в один многоканальный тензор — многомасштабное представление:

$$S_t = \text{stack}(\Phi_t^{(1)}, \dots, \Phi_t^{(L)}) \in R^{d \times d \times L},$$

которое повышает чувствительность к событиям различной длительности без изменения архитектуры модели: малые окна реагируют на кратковременные всплески, большие — на медленные дрейфы [6].

ConvLSTM-автоэнкодер

Последовательность входов $\{X_t\}$, где $X_t = \Phi_t$ при одном масштабе или $X_t = S_t$ при много-масштабном входе) обрабатывается сверточными LSTM-ячейками (ConvLSTM) — рис. 2,

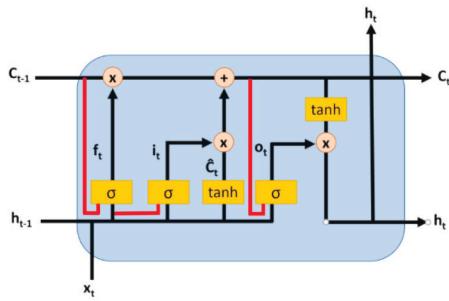


Рис. 2. Структура ConvLSTM-ячейки
(https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-a-ConvLSTM-memory-cell_fig2_359702698
(дата обращения 30.10.2025))

в которых матрицы «вход → состояние» и «состояние → состояние» заменены 2D-свертками по «пространству» сигнатуры. Динамика ячейки на шаге t задается формулами:

$$\begin{aligned}
i_t &= \sigma(W_{xi} * X_t + W_{hi} * H_{t-1} + b_i); \\
f_t &= \sigma(W_{xf} * X_t + W_{hf} * H_{t-1} + b_f); \\
\widetilde{C}_t &= \tanh(W_{xc} * X_t + W_{hc} * H_{t-1} + b_c); \\
C_t &= f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \widetilde{C}_t; \\
o_t &= \sigma(W_{xo} * X_t + W_{ho} * H_{t-1} + b_o); \\
H_t &= o_t \odot \tanh(C_t).
\end{aligned} \tag{4}$$

где $*$ — 2D-свертка; \odot — поэлементное произведение; H_t — скрытое состояние; C_t — состояние ячейки.

Декодер восстанавливает $\widehat{\Phi}_t$ (соответствующий канал/масштаб), стремясь к точной реконструкции нормальных паттернов [7].

Практические настройки. Ядра свертки 3×3 или 5×5 , паддинг *same*, 32–128 карт признаков на слой; пакетная нормализация (Batch Normalization) или нормализация по слоям (Layer Normalization) между ячейками; активации \tanh/σ как в формулах (4). Допустимы прямые соединения (Skip Connections) между симметричными блоками кодировщика и декодировщика [8].

Обучение и регуляризация (обучение без учителя). Модель обучается без учителя на «норме», минимизируя квадратичную ошибку реконструкции:

$$L_{MSE} = \sum_t \left\| \Phi_t - \widehat{\Phi}_t \right\|_F^2. \tag{5}$$

На практике полезной является смешанная функция потерь с *L1*-штрафом и слабой регуляризацией по полной вариации (TV), сглаживающей «зернистые» артефакты:

$$L = \sum_t \left(\left\| \Phi_t - \widehat{\Phi}_t \right\|_F^2 + \lambda_1 \left\| \Phi_t - \widehat{\Phi}_t \right\|_1 + \lambda_{TV} TV(\widehat{\Phi}_t) \right),$$

$$\text{где } TV(\widehat{\Phi}_t) = \sum_{i,j} \sqrt{\left(\nabla_x \widehat{\Phi}_t \right)_{ij}^2 + \left(\nabla_y \widehat{\Phi}_t \right)_{ij}^2} + \varepsilon.$$

Оптимизация: Adam/AdamW — ранняя остановка по валидационному окну; *L2* — регуляризация весов; Dropout (дропаут) — параметр в сверточных блоках.

Временное внимание (Temporal Attention) для длинных последовательностей:

$$\alpha_t = \frac{\exp(q^\top h_t)}{\sum_\tau \exp(q^\top h_\tau)}, \quad \hat{H} = \sum_t \alpha_t h_t,$$

где $h_t = \text{vec}(H_t)$ — агрегированная проекция скрытого состояния; q — обучаемый вектор запроса.

Такой механизм повышает устойчивость к варьирующейся длительности паттернов и позволяет фокусироваться на информативных интервалах.

Анализ ошибки

Скалярная ошибка окна вычисляется как норма Фробениуса разности исходной и восстановленной сигнатурных матриц по формуле

$$e_t = \|\Phi_t - \widehat{\Phi}_t\|_F. \quad (6)$$

Для операционной диагностики формируется тепловая карта вкладов:

$$\Delta_t = \left| \Phi_t - \widehat{\Phi}_t \right|,$$

где каждая ячейка $\Delta_{t,ij}$ отражает величину несогласованности между каналами i и j . Суммирование Δ_t по строкам / столбцам дает рейтинг каналов (датчиков), ответственных за тревогу; максимумы по подматрицам указывают подозрительные кластеры параметров.

Адаптивные пороги

Чтобы корректно работать в условиях дрейфа режимов, применяется адаптивная пороговая обработка.

Квантильный (непараметрический) порог:

$$\tau_t = \text{Quantile}_q(e_{t-w+1}, \dots, e_t), \quad (7)$$

не зависит от предположений о распределении ошибки и легко переносится между объектами.

Порог на основе экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA):

$$z_t = \lambda e_t + (1 - \lambda) z_{t-1}, \quad \text{sd}(z_t) \approx \sigma_e \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}, \quad (8)$$

где $\lambda \in [0,15;0,30]$ — коэффициент сглаживания; σ_e — стандартное отклонение ошибок реконструкции.

Сигнал тревоги формируется при $z_t > \mu_{z_t} + L \cdot \text{sd}(z_t)$, где L подбирают по целевой средней длине пробега (ARL).

Комбинированный критерий: тревога возникает, если одновременно выполняется $e_t > \tau_t$ и / или условие EWMA. Такая схема снижает количество ложных срабатываний от одиночных всплесков и повышает чувствительность к устойчивым смещениям.

Реакция: оповещение, корректирующее воздействие, игнорирование

Для связи с системой автоматического управления (АСУ) формируется вектор системной ошибки:

$$e^{(\text{sys})}(t) = r(t) - X(t),$$

где $r(t)$ — уставки (заданные значения параметров).

Управляющее воздействие вычисляется следующим образом:

$$U(t) = K e^{(\text{sys})}(t), \quad (9)$$

где K — матрица коэффициентов усиления, согласующаяся с политикой управления и требованиями устойчивости.

Такой интерфейс превращает диагностический сигнал в корректирующее действие: изменение уставок, перевод в безопасный режим, вызов обслуживающих процедур.

Вычислительная сложность и ресурсы

Построение сигнатурной матрицы Φ_t по (3) имеет вычислительную сложность $O(sd^2)$ на одно окно, где s — длина окна, d — число каналов.

Многомасштабная версия масштабируется линейно по числу шкал L . Один слой ConvLSTM обрабатывает последовательность длины T за $O(Td^2k^2c)$, где $k \times k$ — размер ядра, c — число карт признаков. Для больших d рекомендуется использовать РСА-сжатие и / или блочную обработку групп коррелированных каналов.

В онлайн-режиме конвейер работает потоково: нормализация и сглаживание $\rightarrow \Phi_t \rightarrow$ кодировщик-декодировщик $\rightarrow (e_t, z_t) \rightarrow$ пороговая обработка \rightarrow тревога и при необходимости управляющее воздействие $U(t)$.

Результаты (Results)

Свойства представления Φ_t . Представление окна процесса в виде сигнатурной матрицы Φ_t (см. формулу (3)) обладает двумя ключевыми свойствами, критичными для устойчивого обучения автоэнкодера. Во-первых, симметричность и нормированная конструкция элементов $\Phi_{t,ij}$ гарантируют ограниченность $|\Phi_{t,ij}| \leq 1$, что снижает влияние масштабов отдельных каналов, препятствуя «взрыву» градиентов при обучении. Ограничение по модулю также означает, что реконструкционная ошибка в норме Фробениуса не может расти лишь из-за различий в единицах измерения. Во-вторых, многомасштабное расширение $\{\Phi_t^{(l)}\}_{l=1}^L$, где для разных l используются окна длины s_l , повышает чувствительность к событиям различной длительности: кратковременные всплески отражаются в «мелких» картах, медленные дрейфы — в «крупных». Это согласуется с результатами исследований, где сигнатурные матрицы подаются в кодировщик-декодировщик ConvLSTM с механизмами внимания: точность реконструкции нормальных паттернов возрастает, а локализация источников аномалий по остаточным картам улучшается и становится более интерпретируемой. Именно таким образом обосновывается архитектура MSCRED, где многомасштабные сигнатурные служат базой для учета межканальных связей и временной динамики [9, 10].

Дополнительный эффект дает косинусоподобная форма (3): если два канала изменяются пропорционально (например, из-за общего возмущения), то их нормированные траектории остаются согласованными и $\Phi_{t,ij} \approx 1$; если изменяется характер взаимосвязи, то это отражается сильнее, чем на отдельно взятом канале. Таким образом, автоэнкодер обучается реконструировать именно *структуру согласованности*, что согласуется с природой групповых аномалий в технологических процессах. Этот прием: явное кодирование межсенсорных взаимосвязей, системно обоснован в работах по многомерным времененным рядам и остаточным сигнатурным матрицам.

Вычислительная сложность. Построение Φ_t по формуле (3) требует порядка $O(s d^2)$ операций для одного окна: для d каналов усредняются $\frac{d(d-1)}{2}$ попарных произведений по s отсчетам. Нормировки по l_2 могут обновляться инкрементально. Эта стадия является вычислительно доминирующей на CPU при очень больших d .

Обработка ConvLSTM имеет сложность $O(Td^2k^2c)$, где T — длина последовательности, $k \times k$ — размер ядра свертки, c — число карт признаков. Память растет линейно по длине последовательности и числу слоев.

Для контроля квадратичного роста по d практически оправдано применение РСА-сжатия до $m \ll d$ информативных компонент, что подробно рассмотрено в работе [11]. Важно, что многомасштабный стек $\{\Phi_t^{(l)}\}_1^L$ увеличивает вычислительные затраты лишь линейно по числу шкал L . При этом рост затрат компенсируется выигрышем в устойчивости реконструкции и разрешающей способности диагностики [1].

Свойства аддитивного порога. В условиях слабой стационарности и медленных структурных дрейфов фиксированные пороги приводят либо к каскаду ложных тревог, либо к пропуску малых сдвигов.

Порог на основе EWMA (см. формулу (8)):

$$z_t = \lambda e_t + (1 - \lambda) z_{t-1},$$

агрегирует недавнюю историю ошибок реконструкции и обеспечивает чувствительность к небольшим (доли стандартного отклонения) смещениям. Классический анализ EWMA-карт показывает, что при $\lambda \in [0,15; 0,30]$ достигается компромисс между скоростью реакции и устойчивостью к шуму.

Предельные линии:

$$\mu_{z_t} \pm L \cdot \text{sd}(z_t),$$

настраиваются по целевой ARL (средней длине пробега), что формально связывает частоту ложных тревог и задержку обнаружения [12, 13]. Однако предположение о конкретной форме распределения ошибок e_t часто не выполняется. Поэтому непараметрический квантильный порог (7) оказывается более устойчивым к распределениям с тяжелыми хвостами и к смене режимов. Его эффективность была показана при мониторинге телеметрии космических аппаратов SMAP и MSL — применение динамического квантильного порогового правила позволило уменьшить частоту ложных срабатываний при сохранении чувствительности [14].

Согласно практическим рекомендациям следует использовать комбинацию процедур: квантильное правило, отражающее структуру хвоста при нестационарности, и EWMA, обеспечивающую раннюю реакцию на малые систематические смещения.

Локализация источника аномалии выполняется на основе тепловой карты $\Delta_t = |\Phi_t - \widehat{\Phi}_t|$, отражающей пространственное распределение остатка:

- большие значения $\Delta_{t,ij}$ указывают пары каналов с наибольшими нарушениями согласованности;
- суммирование по строкам / столбцам позволяет выявить «виновные» датчики;
- поиск связных подматриц с повышенным остатком помогает обнаружить кластеры параметров и предполагаемые узлы причинно-следственных связей.

Такой метод диагностики, как анализ остаточных сигнатур межканальных связей, показал практическую ценность в архитектурах MSCRED: по Δ_t удается локализовать неисправные подсистемы и формировать наглядные визуализации для инженеров-операторов [9].

Обсуждение (Discussion)

Связь с существующими подходами. Использование сверток в рекуррентных переходах является основной идеей ConvLSTM: заменив полносвязные матрицы «вход \rightarrow состояние» и «состояние \rightarrow состояние» на двумерные свертки, модель начинает учитывать локальную пространственную структуру входных данных и ее временную эволюцию. Эта концепция была системно обоснована и подтверждена в задаче прогноза осадков (nowcasting), где и входные, и выходные данные представляют собой пространственно-временные поля. Перенос данной идеи на индустриальные данные, в которых «пространством» выступают взаимосвязи между каналами (сигнатурные матрицы Φ_t), является естественным и эффективным.

Практическая реализация подхода заключается в подаче многомасштабных сигнатурных матриц в ConvLSTM-кодировщик–декодировщик. Такой метод был исследован в архитектуре MSCRED и близких системах, где были получены значимые улучшения как по точности обнаружения аномалий, так и по диагностике их первопричин [9, 10].

Пороговые методы и эксплуатационная устойчивость. С эксплуатационной точки зрения комбинация непараметрического квантильного порогового правила и EWMA-порогового значения позволяет учесть противоречивые требования:

- избегать избыточной чувствительности к единичным всплескам;
- фиксировать малые, но устойчивые сдвиги.

Порог на основе EWMA определяется рекурсией:

$$z_t = \lambda e_t + (1 - \lambda) z_{t-1},$$

где $\lambda \in [0,15; 0,30]$ выбирается как компромисс между скоростью реакции и устойчивостью к шуму.

Пороговые линии:

$$\mu_{z_t} \pm L \cdot \text{sd}(z_t),$$

настраиваются по целевой ARL (средней длине пробега), что позволяет формально увязать частоту ложных тревог с задержкой обнаружения [15, 16].

В то же время квантильная пороговка, вычисляемая по скользящему окну ошибок, является распределенно-независимой (форматно-агностичной) и устойчивой к нестационарным хвостам. В инженерных приложениях сочетание этих процедур показывает лучшие результаты: квантиль стабилизирует работу при смене режимов, а EWMA позволяет оперативно выявлять малые систематические смещения [14].

Таким образом, гибридный режим сочетает преимущества классических методов статистического контроля качества (SPC) и современных подходов мониторинга на основе глубокого обучения.

Ограничения и расширения. Основные ограничения связаны со следующими факторами: квадратичная вычислительная сложность по числу каналов d при построении Φ_t и обработке сверточных блоков. Это ограничение смягчается использованием РСА-сжатия, блочной обработки и инженерной оптимизации вычислений.

Необходимость онлайн-калибровки порогов при смене режимов. Комбинированная схема (квантиль + EWMA) частично решает проблему, однако в реальной эксплуатации полезно дополнение ее процедурными элементами: гистерезисом, подавлением дребезга, масками на сервисные события.

Существует риск переобучения механизмов внимания на редких паттернах, который можно минимизировать регуляризацией и контролем длины обучающих окон.

Перспективные направления развития включают:

- использование гибридных признаков (спектральные и вейвлет-подписи);
- применение графовых рекуррентных сетей для учета физической топологии взаимодействий;
- перенос обучения между схожими технологическими объектами;
- разработку мер доверия и методов объяснимости на основе декомпозиции вкладов Δ_t .

Эти направления соответствуют современным исследованиям глубоких методов обнаружения аномалий в многомерных временных рядах и систем с явным учетом межканальных взаимосвязей [17].

Выводы (Summary)

На основе полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе предложена модель обнаружения аномалий в многомерных временных рядах, основанная на обучении без учителя, ключевые особенности которой включают:

- формализацию межканальных зависимостей через сигнатурные матрицы;
- реконструкцию нормального поведения с помощью ConvLSTM-автоэнкодера;
- адаптивные пороги с учетом дрейфа режимов;
- локализацию источников отклонений и интеграцию с контуром управления.

2. Модель обеспечивает интерпретируемость результатов и устойчива к нестационарности, что делает ее применимой в судостроении для мониторинга и раннего предупреждения отклонений в энергетических установках и технологических линиях.

3. Практическая значимость модели заключается в снижении числа ложных тревог и повышении надежности диагностики при мониторинге судовых энергетических установок и технологических процессов судостроительного производства. Перспективы развития связаны с использованием спектральных и графовых признаков, онлайнового дообучения и расширения методов объяснимости, что обеспечит дальнейшее повышение эффективности цифровых решений в судостроительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee J. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H-A. Kao // Manufacturing Letters. — 2015. — Vol. 3. — Pp. 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
2. Куприяновский В. П. Кибер-физические системы как основа цифровой экономики / В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот, С. А. Синягов // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — Т. 4. — № 2. — С. 18–25. — EDN VKCXLH.

3. *Ozbayoglu A. M. Deep learning for financial applications: A survey / A. M. Ozbayoglu, M. U. Gudelek, O. B. Sezer // Applied Soft Computing. — 2020. — Vol. 93. — Pp. 106384. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106384.*
4. *Адлер Ю. П. Контрольные карты Шухарта в России и за рубежом. Часть 1 / Ю. П. Адлер, О. В. Максимова, В. Л. Шпер // Стандарты и качество. — 2011. — № 7. — С. 82–87. — EDN NXZTNV.*
5. *Åström K. J. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. / K. J. Åström, R. M. Murray. — Princeton: Princeton Univ. Press, 2008. — 408 p.*
6. *Журилова О. Е. Современные методы и задачи спектрального анализа сигналов: краткий обзор и сравнение / О. Е. Журилова, А. В. Башкиров, С. Ю. Белецкая [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2019. — Т. 15. — № 2. — С. 128–131. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.016. — EDN HAUOVJ.*
7. *Hochreiter S. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. — 1997. — Vol. 9. — Is. 8. — Pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.*
8. *SHI X. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting / X. SHI, Z. Chen, H. Wang, D-Y. Yeung, W.-Wong, W.-WOO // Advances in Neural Information Processing Systems. — 28 — Curran Associates, Inc., 2015.*
9. *Zhang C. A Deep Neural Network for Unsupervised Anomaly Detection and Diagnosis in Multivariate Time Series Data / C. Zhang, D. Song, Y. Chen, X. Feng, C. Lumezanu, W. Cheng, J. Ni, B. Zong, H. Chen, N. V. Chawla // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. — 2019. — Vol. 33. — Is. 01. — Pp. 1409–1416. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.33011409.*
10. *Qingning L. Multi-Scale Anomaly Detection for Time Series with Attention-based Recurrent Autoencoders / L. Qingning, L. Wenzhong, Z. Chuanze [и др.] // Proceedings of Machine Learning Research — 189 — PMLR, 2023. — С. 674–689.*
11. *Jolliffe I. T. Principal component analysis: a review and recent developments / I. T. Jolliffe, J. Cadima // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2016. — Vol. 374. — Is. 2065. — Pp. 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.*
12. *Намиот Д. Е. Мониторинг сдвига данных в моделях машинного обучения / Д. Е. Намиот, Е. А. Ильюшин // International Journal of Open Information Technologies. — 2022. — Т. 10. — № 12. — С. 84–93. — EDN NDOMRK.*
13. *Марчук В. И. Анализ методов адаптации порогового значения при обнаружении аномальных измерений / В. И. Марчук, К. Е. Румянцев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2006. — № 1. — С. 29–34. — EDN THUIIR.*
14. *Hundman K. Detecting Spacecraft Anomalies Using LSTMs and Nonparametric Dynamic Thresholding / K. Hundman, V. Constantinou, C. Laporte, I. Colwell, T. Soderstrom // KDD '18 — Association for Computing Machinery, 2018. — С. 387–395. DOI: 10.1145/3219819.3219845.*
15. *Lucas J. M. Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements / J. M. Lucas, M. S. Saccucci // Technometrics. — 1990. — Vol. 32. — Is. 1. — Pp. 1–12. DOI: 10.1080/00401706.1990.10484583.*
16. *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> (дата обращения: 09.08.2025).*
17. *Wang F. A Survey of Deep Anomaly Detection in Multivariate Time Series: Taxonomy, Applications, and Directions / F. Wang, Y. Jiang, R. Zhang, A. Wei, J. Xie, X. Pang // Sensors. — 2025. — Vol. 25. — Is. 1. DOI: 10.3390/s25010190.*

REFERENCES

1. Lee, J., B. Bagheri and H-A. Kao. “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems.” *Manufacturing Letters* 3 (2015): 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
2. Kupriyanovskiy, V. P., D. E. Namiot and S. A. Sinyagov. “Cyber-physical systems as a base for digital economy.” *International Journal of Open Information Technologies* 4.2 (2016): 18–25.
3. Ozbayoglu, A. M., M. U. Gudelek and O. B. Sezer. “Deep learning for financial applications: A survey.” *Applied Soft Computing* 93 (2020): 106384. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106384.
4. Adler, Yu. P., O. V. Maksimova and V. L. Shper. “Kontrol’nye karty Shukharta v Rossii i za rubezhom. Chast’ 1.” *Standards and Quality* 7 (2011): 82–87.

5. Åström K. J. and R. M. Murray. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton: Princeton Univ. Press, 2008: 408 p.
6. Zhurilova, O. E., A. V. Bashkirov et al. "Modern methods and problems of spectral analysis of signals: brief discussion and comparison." *Bulletin of Voronezh State Technical University* 15.2 (2019): 128–131. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.016.
7. Hochreiter, S. and J. Schmidhuber. "Long Short-Term Memory." *Neural Computation* 9.8 (1997): 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
8. SHI, X., W.-. WOO, et al. "Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting." *Advances in Neural Information Processing Systems* — 28Curran Associates, Inc., 2015.
9. Zhang, C., N. V. Chawla, et al. "A Deep Neural Network for Unsupervised Anomaly Detection and Diagnosis in Multivariate Time Series Data." *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* 33.01 (2019): 1409–1416. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.33011409.
10. Qingning, L., L. Sanglu, et al. "Multi-Scale Anomaly Detection for Time Series with Attention-based Recurrent Autoencoders." *Proceedings of Machine Learning Research* — 189PMLR, 2023: 674–689.
11. Jolliffe, I. T. and J. Cadima. "Principal component analysis: a review and recent developments." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374.2065 (2016): 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.
12. Namiot, D. E. and E. A. Il'yushin. "Data shift monitoring in machine learning models." *International Journal of Open Information Technologies* 10.12 (2022): 84–93.
13. Marchuk, V. I. and K. E. Rumyantsev. "Analysis of the adaptation methods of threshold value at detection of abnormal measurements." *Journal of The Russian Universities. Radioelectronics* 1 (2006): 29–34.
14. Hundman, K., T. Soderstrom, et al. "Detecting Spacecraft Anomalies Using LSTMs and Nonparametric Dynamic Thresholding." *KDD '18Association for Computing Machinery*, 2018: 387–395. DOI: 10.1145/3219819.3219845.
15. Lucas, J. M. and M. S. Saccucci. "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements." *Technometrics* 32.1 (1990): 1–12. DOI: 10.1080/00401706.1990.10484583.
16. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. Web. 09 Aug. 2025 <<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>.
17. Wang, F., X. Pang, et al. "A Survey of Deep Anomaly Detection in Multivariate Time Series: Taxonomy, Applications, and Directions." *Sensors* 25.1 (2025). DOI: 10.3390/s25010190.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лиманский Николай Николаевич — ассистент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный экономический университет»
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30–32
e-mail: info@sohoware.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Limanskiy, Nikolay N. — Assistant lecturer
Saint Petersburg State University of Economics
30–32 Gribodoev Canal Emb.,
St. Petersburg, 191023,
Russian Federation
e-mail: info@sohoware.ru

Статья поступила в редакцию: 21 августа 2025 г.

Received: Aug. 21, 2025.

Научное издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 17. № 5

2025 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать 29.10.25. Дата выхода в свет 31.10.25
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 19,75.
Тираж 500 (первый завод 40) экз. Свободная цена. Заказ № 630/25

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