

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. № 3**

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2025



**Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.** — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — Т. 17. — № 3. — 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 диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

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

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

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

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

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

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

**Индекс для подписки в каталоге агентства «Урал-Пресс» — 37276.**

*Учредитель и издатель*

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

*Адрес учредителя и издателя*

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

*Адрес редакции*

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

*e-mail:* journal@gumrf.ru

*http://journal.gumrf.ru*

ISSN 2309-5180



9 772309 518784 >

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ .....309

*Андреева Е. В., Афонин А. Б., Тезиков А. Л.* Оценка и прогнозирование динамики заносимости судоходных каналов в акватории Северного морского пути .....309

*Миرونенко А. А.* Метод расчета координат характерных точек N-фокусной зоны навигационной безопасности.....319

*Изотов О. А.* Моделирование схем обработки насыпных контейнеров на морском терминале .....331

*Моргунов К. П., Богатырёв В. Г.* Компенсация первого обратного пика гидродинамической силы при наполнении камеры шлюза с головной системой питания .....340

*Язвенко М. Р.* Универсальная имитационная модель потока поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт .....350

*Ююкин И. В.* Конфигурирование комплекса сплайн-градиентов при аппроксимации навигационной изолинии линейными кусочными функционалами .....365

*Чихачев А. В.* Способ создания судопогрузочной машины непрерывного действия на базе портального крана .....384

*Бразовская Я. Е., Кадовб Н. С.* Проблемы нормативного и технического регулирования проектного этапа выполнения дноуглубительных работ в акватории морских портов .....396

*Хмельницкая А. А., Буцанец А. А., Хмельницкий К. Е.* Проект маломерного парома с подвесными лодочными моторами для работы на внутренних водных путях .....408

*Оловянных А. Л.* Нахождение оптимального маршрута судна с использованием модифицированного алгоритма A-Star .....418

*Кузнецов А. Л., Кароль А. И., Радченко А. А.* Вывод аналитической зависимости трудоемкости операций по выборке контейнеров из штабеля.....425

Том 17. № 3

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

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

*О. К. Безюков,*  
д-р техн. наук, проф.

*А. Т. Беккер,*  
д-р техн. наук, проф.

*Н. И. Ватин,*  
д-р техн. наук, проф.

*П. А. Гарибин,*  
д-р техн. наук, проф.

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

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](http://www.ural-press.ru/catalog/98131/8994732) (подписной индекс — 37276)

*Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются*

*В. Л. Ерофеев,*  
д-р техн. наук, проф.

*В. А. Жуков,*  
д-р техн. наук, доц.

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

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

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

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

*М. А. Колосов,*  
д-р техн. наук, проф.

*Е. А. Королева,*  
д-р экон. наук, проф.

*И. И. Костылев,*  
д-р техн. наук, проф.

*А. Л. Кузнецов,*  
д-р техн. наук, проф.

*В. А. Логиновский,*  
д-р техн. наук, проф.

*А. В. Макишанов,*  
д-р техн. наук, проф.

*В. Е. Марлей,*  
д-р техн. наук, проф.

*Т. А. Пантина,*  
д-р экон. наук, проф.

*В. И. Решняк,*  
д-р техн. наук, проф.

*А. В. Саушев,*  
д-р техн. наук, доц.

*С. В. Смоленцев,*  
д-р техн. наук, проф.

*С. С. Соколов,*  
д-р техн. наук, доц.

*М. В. Сухотерин,*  
д-р техн. наук, доц.

*А. Л. Тезиков,*  
д-р техн. наук, проф.

*А. А. Чертков,*  
д-р техн. наук, доц.

*В. Б. Чистов,*  
д-р техн. наук, проф.

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА  
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА .....436**

*Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О., Чеблоков А. Д.* Влияние структуры хромовых электролитических покрытий на их кавитационную износостойкость .....436

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ.....449**

*Коротков В. В.* Математическая модель формирования интегральной оценки надежности автоматизированной системы управления на стадии проектирования .....449

## CONTENTS

### OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 309

- Andreeva E. V., Afonin A. B., Tezikov A. L.* Assessment and forecasting of the dynamics of sedimentation of shipping channels in the waters of the northern sea route ..... 309
- Mironenko A. A.* Method for calculating the positions of specific points on the multifocal ship's domain..... 319
- Izotov O. A.* Modeling of bulk container handling schemes at a marine terminal ..... 331
- Morgunov K. P., Bogatyrev V. G.* Compensation of the first reverse peak of the hydrodynamic force during filling of the lock chamber with a head supply system ..... 340
- Yazvenko M. R.* Universal simulation model of cruise and ferry ships flow to a sea passenger port ..... 350
- Yuyukin I. V.* Configuring a complex of splines when approximating the navigational isoline with linear piecewise functionals ..... 365
- Chihachev A. V.* Method of creating continuous shiploader machine based on portal crane..... 384
- Brazovskaya Y. E., Kadovb N. S.* Problems of normative and technical regulation in the project stage of dredging works in the water area of seaports..... 396
- Khmel'nitskaya A. A., Butsanets A. A., Khmel'nitsky K. E.* Project of a small-size ferry with outboard motors for operation on inland waterways ..... 408
- Olovyannikov A. L.* Finding the optimal vessel route using a modified A-Star algorithm..... 418
- Kuznetsov A. L., Karol A. I., Radchenko A. A.* Derivation of the analytical expression for the complexity of container retrieval from a stack ..... 425

Volume 17. № 3

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

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

*O. K. Bezyukov,*  
Doctor of Technical Sciences

*A. T. Bekker,*  
Doctor of Technical Sciences

*N. I. Vatin,*  
Doctor of Technical Sciences

*P. A. Garibin,*  
Doctor of Technical Sciences

*D. P. Goloskokov,*  
Doctor of Technical Sciences

*V. L. Erofeev*,  
Doctor of Technical Sciences

*V. A. Zhukov*,  
Doctor of Technical Sciences

*V. V. Karetnikov*,  
Doctor of Technical Sciences

*A. V. Kirichenko*,  
Doctor of Technical Sciences

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

*M. A. Kolosov*,  
Doctor of Technical Sciences

*E. A. Koroleva*,  
Doctor of Economic Sciences

*I. I. Kostylev*,  
Doctor of Technical Sciences

*A. L. Kuznetsov*,  
Doctor of Technical Sciences

*V. A. Loginovskiy*,  
Doctor of Technical Sciences

*A. V. Makshanov*,  
Doctor of Technical Sciences

*V. Ye. Marley*,  
Doctor of Technical Sciences

*T. A. Pantina*,  
Doctor of Economic Sciences

*V. I. Reshnyak*,  
Doctor of Technical Sciences

*A. V. Saushev*,  
Doctor of Technical Sciences

*S. V. Smolentsev*,  
Doctor of Technical Sciences

*S. S. Sokolov*,  
Doctor of Technical Sciences

*M. V. Sukhoterin*,  
Doctor of Technical Sciences

*A. L. Tezikov*,  
Doctor of Technical Sciences

*A. A. Chertkov*,  
Doctor of Technical Sciences

*V. B. Chistov*,  
Doctor of Technical Sciences

<b>TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION .....</b>	<b>436</b>
<i>Tsvetkov Y. N., Gorbachenko E. O., Cheblov A. D.</i> Influence of the structure of chrome electrolytic coatings on their resistance against cavitation wear.....	436
<b>AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS .....</b>	<b>449</b>
<i>Korotkov V. V.</i> Methodology for forming an integral assessment of the reliability of automated control systems of transport infrastructure at the design stage .....	449

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-309-318

EDN AGRYUC

## ASSESSMENT AND FORECASTING OF THE DYNAMICS OF SEDIMENTATION OF SHIPPING CHANNELS IN THE WATERS OF THE NORTHERN SEA ROUTE

**E. V. Andreeva, A. B. Afonin, A. L. Tezikov**

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

*The assessment and forecasting of the dynamics of sedimentation in shipping channels is a crucial aspect of ensuring year-round navigation for large-tonnage vessels in the waters of the Northern Sea Route, as the Arctic seas and the straits connecting them — especially in the eastern sector — are shallow and require dredging to maintain guaranteed safe depths. This paper describes a developed method for assessing and forecasting the dynamics of sedimentation in shipping channels within the waters of the Northern Sea Route. The main features of dredging conditions in the Arctic seas are highlighted, including the presence of ice for 8–9 months each year, during which dredging is impossible, and a short (3–4 month) period of open water when dredging becomes feasible, while transport vessels and icebreakers navigate the channels year-round. In addition to traditional factors influencing sedimentation processes in sea channels, such as wind-wave phenomena and currents, the propellers of large-tonnage transport vessels and powerful icebreakers also exert a significant impact. This is due to the considerable draft of vessels and the shallow depths of the channels. The theoretical basis of the sedimentation model is presented, which is based on experimental data obtained from bottom relief surveys using multibeam echo sounders. The stages of processing field data for their preparation and application in the mathematical model of sedimentation are detailed. The results of forecasting the calculated sedimentation volumes and their corresponding confidence intervals are provided.*

*Keywords: Northern Sea Route, sedimentation, erosion, large-tonnage vessels, modeling, maritime transport, dredging.*

**For citation:**

Andreeva, Ekaterina V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov “Assessment and forecasting of the dynamics of sedimentation of shipping channels in the waters of the northern sea route”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 309–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-309-318.

**УДК 528.47**

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАНОСИМОСТИ СУДОХОДНЫХ КАНАЛОВ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

**Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков**

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

*Темой исследования является оценка и прогнозирование динамики заносимости судоходных каналов — важная составляющая обеспечения круглогодичной навигации крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути, поскольку арктические моря и соединяющие их проливы, особенно в восточном секторе, мелководны, что требует выполнения дноуглубительных работ для поддержания гарантированных безопасных глубин. Статья посвящена описанию разработанного метода оценки и прогнозирования динамики заносимости судоходных каналов в акватории Северного морского пути. Рассмотрены основные особенности условий выполнения дноуглубительных работ в арктических морях, к которым относятся наличие льда в течение 8–9 месяцев в году, когда проведение дноуглубительных работ является невозможным, короткий (3–4 месяца) период чистой воды, когда выполнение дноуглубительных работ становится*

возможным, при этом плавание транспортных судов и ледоколов по каналам осуществляется круглый год. Отмечается, что наряду с традиционными факторами, влияющими на процессы заносимости морских каналов, такими как ветро-волновые явления и течения, существенное влияние оказывают движители крупнотоннажных транспортных судов и мощных ледоколов ввиду значительной осадки судов и мелководья каналов. Приведено теоретическое обоснование модели заносимости на основе экспериментальных данных, полученных по результатам съемки рельефа дна с применением многолучевых эхолотов. Детально показаны этапы обработки натурных данных для их подготовки и применения в математической модели заносимости. Приведены результаты прогноза расчетных величин объемов заносимости и соответствующие им доверительные интервалы.

*Ключевые слова:* Северный морской путь, заносимость, эрозия, крупнотоннажные суда, моделирование, морские перевозки, дноуглубительные работы.

**Для цитирования:**

Андреева Е. В. Оценка и прогнозирование динамики заносимости судоходных каналов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 309–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-309-318. — EDN AGRYUC.

**Введение (Introduction)**

Комплексное развитие Северного морского пути (СМП) предусматривает значительное увеличение объемов перевозок минерального сырья крупнотоннажными судами, строительство новых и реконструкцию действующих портов, что позволит превратить СМП в круглогодично действующую транспортную магистраль<sup>1</sup>. В качестве примера в таблице приведены характеристики СПГ-танкера «Кристоф де Маржери», который обслуживает проект «Ямал СПГ»<sup>2</sup>.

**Характеристики СПГ-танкера «Кристоф де Маржери»**

Характеристика	Значение
Ледовый класс	Arc 7
Длина, м	299,0
Ширина, м	50,13
Высота по борту, м	26,5
Осадка, м	13,0
Валовая вместимость, т	128 806
Вместимость, м <sup>3</sup>	172 500
Скорость по открытой воде (носом вперед), уз	19,5
Ледопроездимость при движении носом вперед, м	1,5
Ледопроездимость при движении кормой вперед, м	2,5
Диаметр винтов, м	6,0

К основным сдерживающим факторам реализации круглогодичной навигации относятся тяжелые природные условия, ограничивающие сроки навигации и обширные по площади мелководья [1]. Проведение дноуглубительных работ в акватории СМП представляет собой уникальную операцию. Уникальность дноуглубительных работ в акватории СМП определяется условиями их проведения, поскольку имеющийся в настоящее время опыт выполнения дноуглубления относится к акваториям незамерзающих морей и рек. При отсутствии льда предполагается, что основной причиной заносимости служат ветро-волновые и штормовые явления [2], [3]. В арктических районах акватория покрыта льдом в течение 8–9 месяцев в году. Очевидно, что в этот период влияние ветро-волновых и штормовых явлений ослаблено по сравнению с ветро-волновыми и штормовыми явлениями при отсутствии льда.

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства РФ от 01 августа 2022 г. № 2115-р «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.».

<sup>2</sup> Уникальный ледокольный танкер-газовоз «Кристоф де Маржери» [www.sovcomflot.ru](http://www.sovcomflot.ru) (дата обращения 02.04.1025).

Для расчета объемов наносов, в зависимости стадии жизненного цикла объектов, используются различные методики. На стадии проектирования гидротехнических объектов применяются методики, основанные на моделировании гидрометеорологических характеристик района нахождения объекта: атмосферного воздействия, ветрового волнения, течений, объемных величин потоков илистых отложений в толще воды [4].

Используемые на практике методики прогнозирования объемов донных отложений и транспорта взвешенных наносов включают численное моделирование и расчеты параметров как литодинамических процессов, так и транспорта донных наносов, основанных на энергетической концепции Р. Бэнгольда [5], которые подробно изложены в работе [6].

В арктических каналах используются крупнотоннажные суда с мощными энергетическими установками, имеющие винты до 6 м в диаметре. Малый запас воды под килем приводит к тому, что основной причиной эрозии и наносов в канале является турбулентная струя судового движителя [7].

На стадии эксплуатации портов и каналов основными источниками информации для установления проходных глубин и объемов наносов служат материалы гидрографической съемки рельефа дна, которая проводится периодически [8]. Съемка рельефа дна выполняется многолучевым эхолотом при отсутствии льда.

В статье описывается методика оценки заносимости объектов и составления прогнозов объема заносимости, выполненных на основе материалов гидрографической съемки. Предлагаемая методика определения объемов выемки грунта основана на результатах предварительной и исполнительной гидрографических съемок<sup>3</sup>. Сопоставление данных съемок рельефа дна, выполненных в разные годы, позволяет определить объемы наносов, фактические размеры прорези, распределение наносов по длине и ширине прорези и объем выполненных дноуглубительных работ. Полученные данные в дальнейшем используются для составления прогноза заносимости.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Исходными данными для оценки и прогноза заносимости служат отчетные материалы результатов гидрографических исследований, которые содержат результаты предварительной и исполнительной съемок. Помимо этого, необходимо иметь паспорта объектов, отчеты о выполненных исследованиях и проектную документацию объектов. Для каждой съемки предполагается наличие технических отчетов с описаниями организации и производства работ, результатами уро-венных наблюдений в районе производства работ, результатами измерений скорости звука в воде, описанием используемых технических средств и т. п. Качество съемки рельефа дна должно соответствовать требованиям технических заданий.

Отчетные материалы съемки рельефа дна представляют в системе координат WGS-84, проекция UTM (м), в виде текстовых файлов в формате *X, Y, Z*. Планшеты целесообразно формировать в двух видах: планшеты с глубинами, сортированными по минимальным значениям (в целях навигации), и планшеты с глубинами, сортированными по средним значениям (в целях подсчета объема дноуглубительных работ). Отчетные материалы переводятся в цифровой формат.

По объектам выполнялось построение TIN-сеток съемки рельефа дна, которые использовались для подсчета объемов заносимости.

Полученные цифровые модели предназначены для решения следующих задач:

- построение поперечных, продольных профилей;
- вычитание одной цифровой модели из другой с представлением результатов в виде разности глубин с геопривязкой;
- подсчет объемов относительно заданного уровня;
- разделение зон наносов и эрозии от заданного уровня;
- визуализация результатов по заданной пользователем шкале.

<sup>3</sup> РД 31.74.04–2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним: инструкция. Ростов н/Д, 2004.

Предварительная обработка материалов для каждого объекта и по каждому году включала:

- определение границ съемки объекта;
- определение границ объекта по нижней бровке;
- разбивка площади объекта по пикетам;
- разбивка площади объекта по планшетам;
- определение параметров заносимости объектов.

На рис. 1 представлена схема разбивки объекта по пикетам и планшетам.

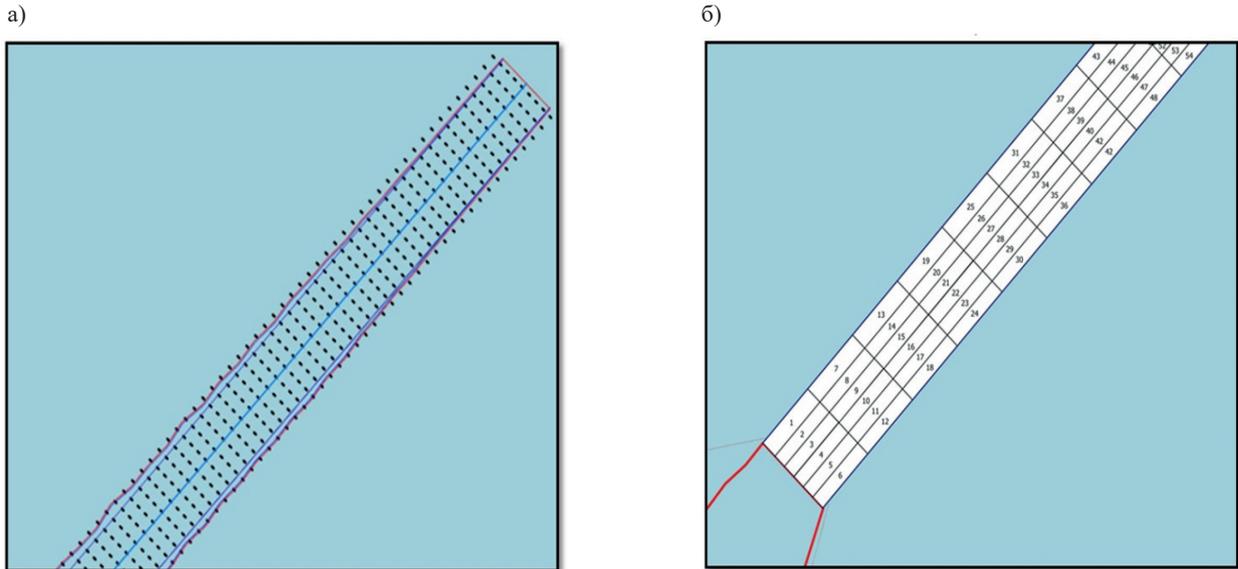


Рис. 1. Разбивка объекта на расчетные области:  
а — поперечный пикетаж; б — планшеты

Для каждого года съемки применительно к конкретному объекту использовалась одинаковая схема разбивки объекта на пикеты и планшеты.

По каждому пикету строились профили рельефа дна. Профиль позволял определить положение поверхности рельефа дна относительно его проектной отметки. Сравнение профилей, относящихся к разным годам, использовалось для определения зон заносимости и зон размыва (эрозии) дна. На рис. 2 приведена схема сравнения профилей, относящихся к разным годам, с выделенными зонами заносимости и эрозии. Зоны заносимости и эрозии определялись по разностям глубин между глубинами предварительной съемки текущего года и глубинами исполнительной съемки предыдущего года.

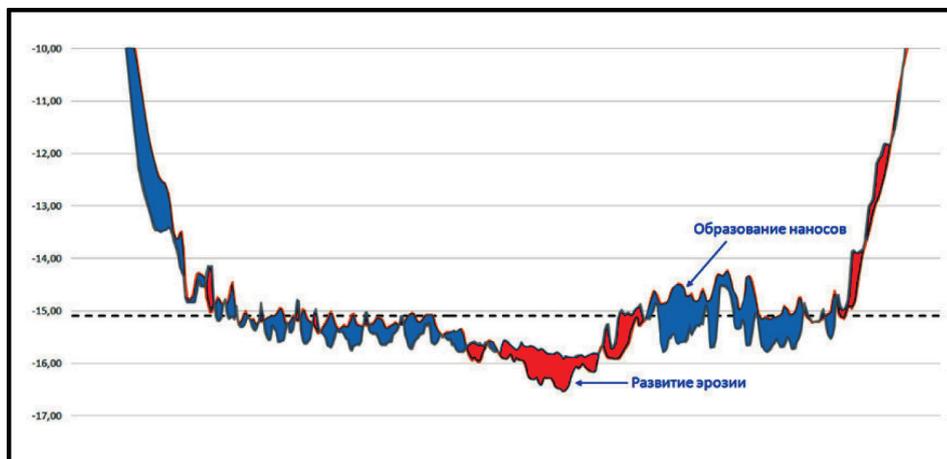


Рис. 2. Схема сравнения профилей, относящихся к разным годам, с выделенными зонами заносимости и эрозии

На рис. 2 пунктирной линией показана проектная отметка дна. Красным цветом обозначены зоны эрозии, синим — зоны заносимости. Профили, построенные перпендикулярно профилям пикетов, использовались для оценки заносимости по этому направлению. Разбивка площади объекта по планшетам использовалась для сравнительной оценки параметров заносимости по площадям.

Каждый планшет пронумерован индексами  $i$  и  $j$  ( $i$  — номер планшета в поперечном направлении относительно оси канала;  $j$  — номер планшета в направлении оси канала). На рис. 3 показан пример разбивки объекта на планшеты.

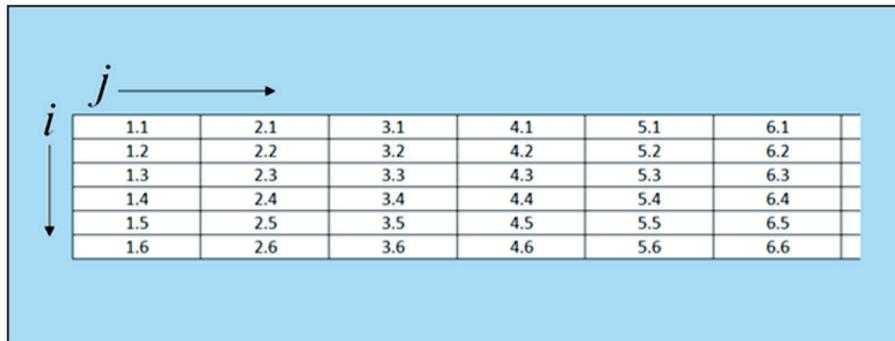


Рис. 3. Схема нумерации планшетов

Для каждого планшета по материалам съемки для каждого года вычислялись:

- средняя толщина слоя наносов;
- объем наносов;
- средняя толщина слоя эрозии;
- объем эрозии.

Полученные данные используются для оценки заносимости по всей площади объекта, а также позволяют определить области повышенной заносимости и повышенной эрозии и области, находящиеся в равновесном состоянии.

Объем заносимости объекта по данным, представленным на регулярной решетке ( $\Delta x = \text{const}$ ,  $\Delta y = \text{const}$ ), соответствует разности объемов грунта, полученных на основе данных предварительной и исполнительной съемки, выполненных с интервалом в один год:

$$\Delta V(T, T-1) = V_{\text{пр}}(T) - V_{\text{исп}}(T-1). \quad (1)$$

Площадь съемки, охватывающей все элементарные прямоугольники со сторонами  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , в вершинах которых измерены глубины, определяется по формуле

$$S(T) = S(T-1) = \Delta x \cdot \Delta y \left[ N_1 + \left( \frac{N_2}{2} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

где  $N_1$  — количество отметок глубин, попадающих во внутреннюю область площади съемки;

$N_2$  — количество отметок глубин, расположенных на внешней границе выделенной площади.

Для определения средней толщины слоя заносимости выделенного участка используется выражение

$$h_{\text{ср}} = \frac{\Delta V(T, T-1)}{S(T)}. \quad (3)$$

Динамику заносимости характеризует ряд  $\Delta V_j = \Delta V(T)$ , где  $T$  — год съемки, значение которого меняется от  $T_{\text{min}}$  — года выполнения первой съемки рельефа дна, до  $T_{\text{max}}$  — года выполнения самой поздней съемки рельефа дна.

Средняя заносимость района определяется по формуле

$$\Delta \bar{V} = \frac{\sum_1^n \Delta V(T_j)}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} = \frac{\sum_1^n \Delta V_j}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}, \quad (4)$$

где  $n$  — количество членов ряда.

Среднее квадратическое (стандартное) отклонение заносимости задается выражением

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta V_j - \bar{\Delta V})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Статистический ряд  $\Delta V_j (j = 1, \dots, n)$  характеризует динамику заносимости канала.

На заносимость оказывают влияние следующие факторы:

- форма и размеры канала;
- периодичность выполнения дноуглубительных работ
- движение судов по каналу, том числе размерения судов, их скорость и направление движения;
- речной сток;
- ветро-волновые процессы;
- тип грунта.

На заносимость существенное влияние оказывают движители крупнотоннажных судов.

При движении судов по мелководным морским каналам происходит размыв грунта под воздействием струи воды от судовых гребных винтов в полосе эрозии шириной  $b_3$  [7]. Грунт выносятся в зоны, непосредственно примыкающие справа и слева к полосе  $b_3$ . Зоны формируемых наносов имеют ширину  $b_n = b_n^{\text{прав}} + b_n^{\text{лев}}$ . Положение полос показано на рис. 4.

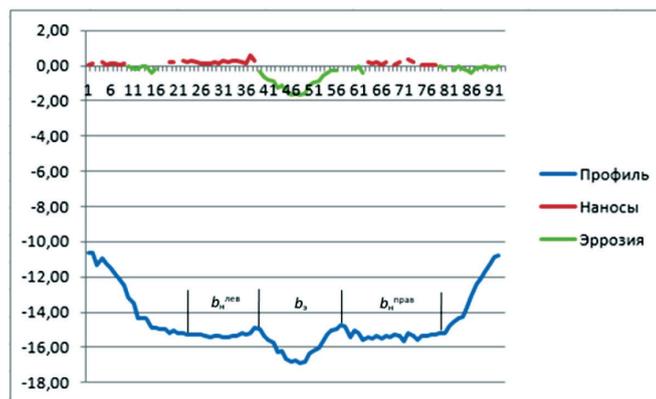


Рис. 4. Зоны формирования наносов под воздействием струи воды от гребного винта судна

Влияние одного судна на заносимость характеризуется показателем  $\rho$ , величина которого определяется соотношением

$$\rho = \frac{\Delta V_n(b_n)}{lN}, \quad (6)$$

где  $l$  — длина канала;

$N$  — количество судов, прошедших по каналу за год.

### Результаты (Results)

В качестве примера оценим влияние судов на заносимость подходного канала в Карском море на основе данных за 2020–2019 гг. и 2021–2020 гг.

1. Данные 2020–2019 гг.:

- $b_3 = 75$  м;
- $b_n^{\text{прав}} = b_n^{\text{лев}} = 62,5$  м;
- $V_n(b_n) = 21523$  м<sup>3</sup>;
- $N = 282$ ;
- $l = 5,65$  км.

Результаты оценки:  $\rho_{2020} = 13,51 \text{ м}^3/\text{км}$ .

2. Данные 2021–2020 гг.:

$b_3 = 75 \text{ м}$ ;

$b_{\text{н}}^{\text{прав}} = b_{\text{н}}^{\text{лев}} = 62,5 \text{ м}$ ;

$V_{\text{н}}(b_{\text{н}}) = 14200 \text{ м}^3$ ;

$N = 277$ ;

$l = 5,65 \text{ км}$ .

Результаты оценки:  $\rho_{2021} = 9,15 \text{ м}^3/\text{км}$ .

Принятое значение параметра  $\rho$  для одного судна, проходящего по подходному каналу:

$$\rho = \frac{\rho_{2020} + \rho_{2021}}{2} = \frac{13,51 + 9,15}{2} = 11,81 \text{ м}^3/\text{км}. \quad (7)$$

Прогноз заносимости выполняется на основе статистического ряда объемов наносов  $\Delta V_j = \Delta V(T)$ .

Статистический ряд приводится к однородному состоянию путем фильтрации. После этого определяются следующие характеристики отфильтрованного ряда:

$\bar{T}$  — год, соответствующий середине ряда наблюдений;

$\sigma_V$  — среднее квадратическое отклонение заносимости;

$\Delta V_0$  — объем наносов, соответствующий году  $\bar{T}$ ;

$N(\bar{T})$  — количество судов, работавших в акватории в течение года  $\bar{T}$ ;

$\rho$  — показатель влияния судна на заносимость;

$k$  — количество членов статистического ряда.

Кроме того, для вычисления прогноза заносимости используются следующие данные:

$T$  — год, на который выполняется прогноз;

$N(T)$  — ожидаемое количество судов, которое будет работать в акватории в течение года  $T$ ,

на который составляется прогноз;

$n$  — степень свободы, соответствующая числу членов статистического ряда,  $n = k - 1$ ;

$t_{n,p}$  — коэффициент Стьюдента, соответствующий степени свободы  $n$  и вероятности  $p$  [9];

$p = 0,90$  — принятое значение вероятности;

$l$  — протяженность канала, км.

Для вычисления прогнозируемой величины заносимости  $\Delta V(T)$  с доверительным интервалом используется выражение [10], адаптированное к задачам дноуглубления морских каналов:

$$\Delta V(T) = \Delta V_0 + \rho N l \pm \sigma_V t_{n,p} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(T - \bar{T})^2}{\sum_1^k (T_i - \bar{T})^2}\right)}. \quad (8)$$

Итоговые оценки прогноза объемов заносимости задаются тремя показателями:

$\Delta V^{\text{cp}}(T)$  — среднее значение;

$\Delta V^{\text{в}}(T)$  — верхнее значение доверительного интервала;

$\Delta V^{\text{н}}(T)$  — нижнее значение доверительного интервала,

определяемыми по формулам:

$$\Delta V^{\text{cp}}(T) = \Delta V_0 + \rho N(T) l; \quad (9)$$

$$\Delta V^{\text{в}}(T) = \Delta V_0 + \rho N(T) l + \sigma_V t_{n,p} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(T - \bar{T})^2}{\sum_1^k (T_i - \bar{T})^2}\right)}; \quad (10)$$

$$\Delta V^{\text{н}}(T) = \Delta V_0 + \rho N(T) l - \sigma_V t_{n,p} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(T - \bar{T})^2}{\sum_1^k (T_i - \bar{T})^2}\right)}. \quad (11)$$

При отсутствии заносимости канала численные значения оценок верхней (10) и нижней (11) границ доверительного интервала совпадают со средним значением (9).

### Обсуждение (Discussion)

Модель прогноза (9)–(11) построена по данным статистического ряда  $\Delta V_j = \Delta V(T)$ . По мере поступления новой информации о заносимости объекта исходный статистический ряд принимает вид:  $\Delta V_{j+1} = \Delta V(T^*)$ , где  $T^* = T + \Delta T$ .

Прогностическая модель должна быть приведена в соответствие с обновленным статистическим рядом. Обновление затрагивает следующие параметры:  $\Delta V_0$ ,  $\rho$ ,  $N(T)$ ,  $\sigma_V$ ,  $t_{n,p}$ ,  $T$  и  $\bar{T}$ .

Обновление статистического ряда приводит к тому, что первое прогнозируемое значение заносимости предыдущего года заменяется на его значение, полученное экспериментальным путем. Это позволяет расширить объем исходного статистического ряда на одно значение, а также уточнить значение дисперсии величины заносимости, показатели доверительного интервала и прогнозируемой величины заносимости на заданный год.

Модель прогноза (9)–(11) учитывает влияние движителей транспортных судов и ледоколов на дно и откосы канала. Предлагаемая методика, основанная на натурных измерениях глубин, не требует специальных дополнительных исследований литодинамических процессов перемещения наносов и определения гранулометрического состава наносов, а также величин и направлений сил, влияющих на их кинематику.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Обоснована актуальность оценки и прогнозирования динамики заносимости судоходных каналов в акватории Северного морского пути.
2. Отмечены особенности образования наносов в судоходных каналах арктических морей, связанные с ледовитостью акватории и воздействием движителей крупнотоннажных транспортных судов и мощных арктических ледоколов на дно и откосы морских каналов.
3. Разработаны цифровые модели рельефа дна, построенные по данным гидрографической съемки с использованием многолучевых эхолотов.
4. Разработана вероятностная прогностическая модель накопления наносов в морских каналах, определены параметры модели и методика вычисления их значений по данным промерных работ.
5. После проведения дополнительных исследований предложенная методика может служить теоретической основой для использования в руководящих документах по проведению дноуглубительных работ в арктических морях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афонин А. Б.* Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съёмки рельефа дна / А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик, А. Л. Тезиков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4(38). — С. 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68. — EDN WLUCQD.
2. *Кожухов И. В.* Системный подход к изучению потоков наносов в мелководной зоне морей для обеспечения нормального режима судоходства / И. В. Кожухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3(61). — С. 30–34. — EDN MVSNZF.
3. *Иглин С. М.* Пространственно-временные особенности заносимости канала Мудьюгских башен в морском порту Архангельск / С. М. Иглин, В. Б. Коробов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. — 2019. — № 2. — С. 48–58. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-2-48-58. — EDN AUUVNE.
4. *Логвина Е. А.* Оценка заносимости подходного и морского каналов к порту в поселке Сабетта полуострова Ямал / Е. А. Логвина, В. А. Гладыш, Н. В. Кубышкин [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2012. — № 4(94). — С. 105–120. — EDN PMIVAN.

5. Ткачев А. А. Анализ мероприятий по борьбе с заносимостью Волго-Каспийского канала / А. А. Ткачев, К. И. Ключенко // Мелиорация и гидротехника. — 2022. — Т. 12. — № 4. — С. 333–348. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-333-348. — EDN WDWFAAG.

6. Дианский Н. А. Моделирование гидrometeorологических характеристик в Карском и Печорском морях и расчет наносов у западного побережья полуострова Ямал / Н. А. Дианский, И. М. Кабатченко, В. В. Фомин [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. — 2015. — № 2(22). — С. 98–105. — EDN WJGPUR.

7. Лобачев М. П. Численное моделирование взаимодействия струи от винта с грунтом / М. П. Лобачев, А. В. Пустошный, К. Е. Сазонов, И. А. Чичерин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2008. — Т. 1. — № 1. — С. 88–98. — EDN KNPJED.

8. Пиляев С. И. Применимость различных теорий волнения для расчета гидробиотехнических сооружений в условиях относительного мелководья / С. И. Пиляев, Н. А. Губина // Вестник МГСУ. — 2014. — № 3. — С. 228–235. — EDN RYXTUB.

9. Селютин В. Д. Прогнозирование как способ осуществления прикладной направленности курса теории вероятностей и математической статистики / В. Д. Селютин, Е. В. Лебедева // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. — 2014. — № 1(57). — С. 393–399. — EDN STYVWZ.

10. Дармокрик Г. П. Статистические методы прогнозирования в экономике / Г. П. Дармокрик, А. Н. Куликов // Вестник научных конференций. — 2015. — № 1–3. — С. 40–44. — EDN UXWXMT.

## REFERENCES

1. Afonin, A. B., E. O. Otkhovik and A. L. Tezikov. “Development of the assessment methods of anadromous depths on the northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.

2. Kozhukhov, I. V. “Systems approach to the study of flow of sediment in the shallow sea zone to ensure normal shipping.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(61) (2010): 30–34.

3. Iglin, S. M. and V. B. Korobov. “Spatial and temporal peculiarities of sedimentation in the chanal of the muddyug towers in the sea port arkhangel'sk.” *Ecological Safety Of Coastal And Shelf Zones Of Sea* 2 (2019): 48–58. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-2-48-58.

4. Logvina, E. A., V. A. Gladyshev, N. V. Kubyshev, et al. “Otsenka zanosimosti podkhodnogo i morskogo kanalov k portu v poselke Sabetta poluostrova Yamal.” *Arctic And Antarctic Research* 4(94) (2012): 105–120.

5. Tkachev, A. A. and K. I. Klyuchenko. “Analysis of measures to combat the volga-caspian canal sedimentation.” *Land Reclamation And Hydraulic Engineering* 12.4 (2022): 333–348. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-333-348.

6. Dianskiy, N. A., I. M. Kabatchenko, V. V. Fomin, et al. “Modelirovanie gidrometeorologicheskikh kharakteristik v Karskom i Pechorskom moryakh i raschet наносов u zapadnogo poberezh'ya poluostrova Yamal.” *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Vesti gazovoy nauki* 2(22) (2015): 98–105.

7. Lobachev, M. P., A. V. Pustoshnyy, K. E. Sazonov and I. A. Chicherin. “Numerical simulation of propeller wake interactions with the bottom soil.” *Fundamental And Applied Hydrophysics* 1.1 (2008): 88–98.

8. Pilyaev, S. I. and N. A. Gubina. “Applicability of various wave movement theories for calculating hydrobiotechnical constructions in the conditions of relative shoal.” *Vestnik Mgsu* 3 (2014): 228–235.

9. Selyutin, V. D. and E. V. Lebedeva. “Forecasting as a means of application-oriented teaching of probability theory and mathematical statistics course.” *Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye i sotsial'nye nauki* 1(57) (2014): 393–399.

10. Darmokrik, G. P. and A. N. Kulikov. “Statisticheskie metody prognozirovaniya v ekonomike.” *Vestnik nauchnykh konferentsiy* 1–3 (2015): 40–44.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Андреева Екатерина Валерьевна** —  
 кандидат технических наук  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [AndreevaEV@gumrf.ru](mailto:AndreevaEV@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andreeva, Ekaterina V.** —  
 PhD of Technical Sciences  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian  
 Federation  
 e-mail: [AndreevaEV@gumrf.ru](mailto:AndreevaEV@gumrf.ru)

**Афонин Андрей Борисович** —

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

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

e-mail: [andrey.afonin.gma@yandex.ru](mailto:andrey.afonin.gma@yandex.ru),  
[kaf\\_gm@gumrf.ru](mailto:kaf_gm@gumrf.ru)

**Тезиков Александр Львович** —

доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

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

e-mail: [altezikov@yandex.ru](mailto:altezikov@yandex.ru), [TezikovAL@gumrf.ru](mailto:TezikovAL@gumrf.ru)

**Afonin, Andrej B.** —

PhD of Technical Sciences, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping

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

e-mail: [andrey.afonin.gma@yandex.ru](mailto:andrey.afonin.gma@yandex.ru),  
[kaf\\_gm@gumrf.ru](mailto:kaf_gm@gumrf.ru)

**Tezikov, Aleksandr L.** —

Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping

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

e-mail: [altezikov@yandex.ru](mailto:altezikov@yandex.ru), [TezikovAL@gumrf.ru](mailto:TezikovAL@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 09 апреля 2025 г.*

*Received: Apr. 9, 2025.*

## METHOD FOR CALCULATING THE POSITIONS OF SPECIFIC POINTS ON THE MULTIFOCAL SHIP'S DOMAIN

**A. A. Mironenko**

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

*The concept of approximating of a ship's domain on the ground of the continuous deformable media is considered as a continuous set of points of the multifocal ellipse. It is also applicable in the navigational hazards clearing problem. The configuration of the multifocal ellipse ship's domain allows to present more accurately the information of the various kinematic and dynamic parameters of the vessel's motion and generate the control actions to ensure safety of navigation. If ship's domain is formalized as the multifocal ellipse safety of navigation requires the development of the principles of control actions on the kinematic level. The non-trivial problem of determining the positions of the special points on the ship's domain: the closest point on the ship's domain to the navigational hazard, intersection point with the relative motion line, and the "extreme" points arises. Due to the nonlinearity of the multifocal ellipse equation, variations of the size and shape of the ship's domain caused by the ship's movement and the current navigation situation, the represented results are grounded on the classical navigational position fix method — the generalized method of the position lines. The general provisions of the research are supported by the infographics and are brought to practical application. The formalization of the proposed methods in the automatic navigation or in autonomous ship's control systems will enable the navigator on board or operating the vessel remotely to solve the various navigation problems on a new level and in interconnection with traditional methods of safety of navigation monitoring.*

*Keywords: ship's domain, multifocal ellipse, position line, relative motion line, specific points.*

**For citation:**

Mironenko, Aleksandr A. "Method for calculating the positions of specific points on the multifocal ship's domain." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 319–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-319-330.

**УДК 656.61.052.4**

## МЕТОД РАСЧЕТА КООРДИНАТ ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК N-ФОКУСНОЙ ЗОНЫ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**А. А. Мироненко**

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

*Рассмотрена концепция аппроксимации геометрической формы зоны навигационной безопасности судна в идеологии образов сплошных деформируемых сред как непрерывное множество точек N-фокусного эллипса, который также можно использовать применительно к задаче ограждения навигационных опасностей. Данная конфигурация позволяет точнее учитывать информацию о полях различных кинематических и динамических параметрах движения судна и генерировать управляющие воздействия по обеспечению заданного уровня безопасности плавания. Отмечается, что решение задачи обеспечения безопасности судовождения при формализации зоны навигационной безопасности судна в виде N-фокусного эллипса первоначально требует разработки принципов управления на кинематическом уровне. При этом возникает нетривиальная задача определения координат особых «характерных» точек на границе зоны навигационной безопасности, таких как точка, ближайшая к навигационной опасности, находящаяся на пересечении с линией относительного движения, «крайние» точки. В том числе из-за нелинейности уравнения N-фокусного эллипса, изменений размеров и формы зоны навигационной безопасности, вызванных движением собственного судна и меняющейся навигационной обстановки, предлагается решение, базирующееся на одном из классических методов определения местоположения в навигации — обобщенном методе линий положения. Основные положения изыскания подкреплены инфографикой и доведены до уровня*

непосредственного практического применения. Сделан вывод о том, что формализация предлагаемых методов и алгоритмов в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту или управляющему ими дистанционно решать задачи судовождения на качественно новом уровне в неразрывной связи с традиционными методами контроля безопасности мореплавания.

*Ключевые слова:* зона навигационной безопасности, зона навигационной безопасности, многофокусный эллипс, линия положения, линия относительного движения характерные точки.

**Для цитирования:**

Мироненко А. А. Метод расчета координат характерных точек  $N$ -фокусной зоны навигационной безопасности / А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 319–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-319-330. — EDN DCODQX.

### Введение (Introduction)

В соответствии с требованиями и рекомендациями международных морских нормативных документов: SOLAS-74, STSW-78, А.893(21), важнейшей задачей судоводных компаний является обеспечение безопасности судовождения, которая может быть достигнута при соблюдении комплекса мер, выполняемых судоводительским персоналом. Комплекс мер предусматривает обязательное изучение района плавания, анализ опыта предыдущих переходов и последующее планирование программной траектории (ПТ) судна с гарантированной полосой проводки (ГПП) и режимами движения на навигационной карте [1]. В пределах ГПП по ПТ должны быть учтены все известные навигационные опасности (НО) и обеспечено достаточное пространство для маневров. В ходе рейса оперативно осуществляется непрерывный контроль путем сопоставления текущих координат местоположения (географических и / или полярных) и параметров движения от запланированных. Очевидно, что при этом необходим непрерывный анализ отсутствия НО как статических: опасных глубин, изобат, средств навигационного оборудования (СНО), нефтяных вышек, буровых платформ и др., так и динамических: судов, кораблей и др., в пределах некоторого водного пространства вокруг судна, обеспечивающего безопасное плавание, причем в практике судовождения эта задача сводится к решению на плоскости и под такого рода пространством принято понимать зону навигационной безопасности (ЗНБ) судна.

В зарубежных и отечественных исследованиях [2]–[16] рассматриваются разнообразные математические модели (концепции) зоны навигационной безопасности (ЗНБ), предложенные на разных исторических этапах развития методов судовождения. Например, в [4] исследуется модель круговой и эллиптической формы. Автор исследования [5] предлагает формирование ЗНБ по известным (обсервованным) координатам двух разнесенных точек судна. Оригинальность исследования [6] заключается в динамическом изменении ЗНБ эллиптической формы под маршрут движения судна, а статья [9] относится к практике применения Правил МППСС-72 для ЗНБ эллиптической формы. Сравнительному обзору основных этапов развития моделей ЗНБ посвящены работы [7], [13]. Оригинальные концепции ЗНБ полигональной формы и комплексной ЗНБ эллиптической формы предложены авторами, соответственно, исследований [8] и [10]. Исследования, проведенные зарубежными учеными [11], [12], [14]–[16], подтверждают состоятельность концепции ЗНБ эллиптической формы на основе анализа экспериментальных данных об элементах движения судов в стесненных условиях плавания.

Применению моделей ЗНБ для решения актуальной проблемы расхождения судов в море посвящены работы [17] – [22]. Например, в [17] предлагается решение методами теории нечетких множеств, в [18], с учетом реалий развития средств навигации, под маршрутом движения судна понимается программная траектория (ПТ), а задача расхождения судов решается на графе. Авторы исследования [19] задачу расхождения судов предлагают решать на основе использования идеологии «машины Дубинса», т. е. заданием кривой поворота дугами окружностей, а исследователи [20] предлагают решать данную задачу на основе концепции ЗНБ прямоугольной формы. В исследовании [21] предлагается учитывать погрешности определения места судна (ОМС) в общем случае

радиальной. Автор исследования [23] подвергает анализу различные модели ЗНБ и поднимает вопрос оценки размеров зоны допустимого сближения судов при различных навигационных ситуациях.

В исследовании [1] предлагается обобщение концепций геометрических форм: *окружность – эллипс – многофокусные кривые*, предназначенных для аппроксимации границ НО с «привязкой» к изолиниям навигационных параметров, в зависимости от сложности, возможностей бортовых технических средств судовождения (ТСС) и условий плавания. В исследовании авторов [3] метод адаптирован для формализации контура ЗНБ в идеологии сплошных деформируемых сред в виде непрерывного многообразия точек  $N$ -фокусного эллипса, изменяющегося в зависимости от условий плавания.

Целью настоящего исследования является разработка обобщенного алгоритма для нахождения особых «характерных» точек на границе ЗНБ, в частности ближайшей к НО, расположенной на пересечении ЗНБ с линией относительного движения (ЛОД) цели, «крайних» точек на ЗНБ для анализа риска столкновения и действий по безопасному расхождению.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В общем виде принципы формализации модели  $N$ -фокусного эллипса, аппроксимирующего ЗНБ, рассмотрены в работе [3]. Первоначально аппроксимируются геометрические размеры судна в виде ЗНБ прямоугольной формы, затем вводится эллиптическая ЗНБ, учитывающая в том числе радиальную среднюю квадратическую погрешность (СКП) координат обсервованного места судна (ОМС) — рис. 1:

$$\begin{aligned} a &= (L + M_o) / \sqrt{2} ; \\ b &= (B + M_o) / \sqrt{2} ; \\ c &= \sqrt{a^2 - b^2} , \end{aligned} \quad (1)$$

где  $L, B$  — наибольшие длина и ширина судна;

$M_o$  — радиальная СКП координат ОМС;

$a, b$  — соответственно большая и малая полуоси эллиптической ЗНБ;

$c$  — фокальное расстояние.

Первоначально геометрические размеры судна и радиальная СКП координат ОМС аппроксимируются ЗНБ прямоугольной формы относительно центральной линии ДП судна в прямоугольной системе координат, затем по размерам ЗНБ прямоугольной формы рассчитываются параметры эллиптической ЗНБ.

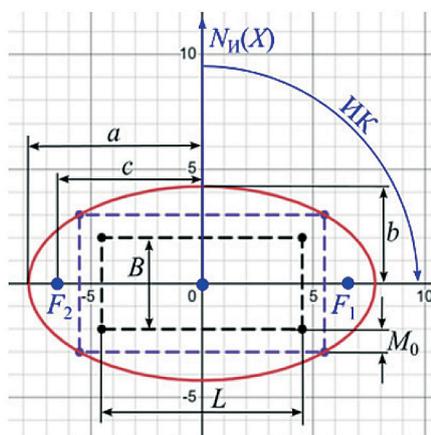


Рис. 1. Построение двухфокусного эллипса по размерам ЗНБ прямоугольной формы:

$O$  — центр системы координат, судна, прямоугольной и эллиптической ЗНБ;

$F_1, F_2$  — фокусы двухфокусного эллипса ЗНБ; ИК — истинный курс

В контексте исследования [3] эти фокусы принимаются за «неподвижные» (связанные с текущей позицией судна), а их координаты в зависимости от текущего ИК судна определяются через проекции фокальных расстояний (1) на координатные оси:

$$\begin{aligned}x_{F_1} &= x_0 + x_c; & y_{F_1} &= y_0 + y_c; \\x_{F_2} &= x_0 - x_c; & y_{F_2} &= y_0 - y_c; \\x_c &= c \cos \text{ИК}; & y_c &= c \sin \text{ИК},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $x_c, y_c$  — проекции фокальных расстояний на координатные оси;

$(x_{F_1}, y_{F_1}), (x_{F_2}, y_{F_2})$  — прямоугольные координаты первого ( $F_1$ ) и второго ( $F_2$ ) фокусов относительно центра судна.

Связанный с текущей позицией двухфокусный эллипс ЗНБ при этом учитывает геометрические составляющие (размеры судна) и СКП определения координат местоположения ТСС, а также является исходным в концепции формализации модели ЗНБ в виде  $N$ -фокусного эллипса [3].

Дополнительно в зависимости от условий плавания, сложности решаемых задач, требуемой точности аппроксимации контура ЗНБ судна в рамках концепции, разработанной в исследовании [2] и, в зависимости от технических характеристик / возможностей ТСС определяются количество и позиции «подвижных» фокусов, что непосредственно влияет на форму и размеры  $N$ -фокусного эллипса. Например, в работе [3] предлагаются следующие выражения для расчета координат третьего «подвижного» фокуса трехфокусного эллипса ЗНБ:

$$\begin{aligned}x_{F_3} &= x_0 + (V + m_v) \cos \text{ПУ} \Delta t; \\y_{F_3} &= y_0 + (V + m_v) \sin \text{ПУ} \Delta t,\end{aligned}\quad (3)$$

где  $V$  — скорость судна относительно грунта;

$m_v$  — СКП скорости относительно грунта;

$\Delta t$  — период прогноза.

Обобщенная математическая модель  $N$ -фокусного эллипса, аппроксимирующего ЗНБ в работе [3], конструируется по текущим значениям вектора движения судна относительно грунта с учетом СКП их измерения:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N \sqrt{(x - x_{F_i})^2 + (y - y_{F_i})^2} &= a_N; \\a_N &= Na + (N - 2)(V + m_v) \Delta t + \frac{m_{\text{ПУ}}}{(V + m_v) \Delta t} \text{ при } V \neq 0; \\a_N &= Na + (N - 2)m_v \Delta t \text{ при } V = 0,\end{aligned}\quad (4)$$

где  $N$  — общее количество фокусов, два из которых «неподвижные»;

$(N - 2)$  — количество «подвижных» фокусов.

Для любой точки  $N$ -фокусного эллипса должно соблюдаться следующее условие:

$$\sum_{i=1}^N D_i = a_N = \text{const}, \quad (5)$$

где  $D_i$  — расстояние от точки  $N$ -фокусного эллипса до  $i$ -го фокуса.

Таким образом, в общем виде  $N$ -фокусный эллипс, аппроксимирующий ЗНБ, может быть представлен в форме кортежа:

$$SD = \left\{ SD_i \Big|_{i=1}^N, SD_i = \left[ (x_{F_i}, y_{F_i}), V, m_v, \Delta t, \text{ПУ}, m_{\text{ПУ}} \right] \right\}. \quad (6)$$

$N$ -фокусный эллипс, в частности трехфокусный, можно также рассматривать как семейство точек пересечения множества софокусных двухфокусных эллипсов (построенных относительно «неподвижных» фокусов ( $F_1, F_2$ ) — рис. 2) при переменном значении главных полуосей ( $a, b$ ), но неизменном фокусном расстоянии  $c$  с окружностями переменного радиуса с центром  $F_3$  (см. рис. 3) в «подвижном» фокусе при выполнении условия (5). В общем случае получается

по две точки пересечения софокусных эллипсов с окружностями и два частных варианта, каждый из которых дает по одной точке пересечения.

В исследовании [1] получены выражения для направления и модуля полного (суммарного) градиента изолинии ограждающего НО  $N$ -фокусного эллипса, предлагаемые использовать в рамках настоящего исследования для решения задач обеспечения требуемых условий безопасности плавания судна (см. рис. 2):

$$\tau_{\Sigma D} = \arctg \left( \frac{\sum_{i=1}^N \sin \tau_i}{\sum_{i=1}^k \cos \tau_i} \right);$$

$$g_{\Sigma D} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^k \sin \tau_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^k \cos \tau_i \right)^2},$$

где  $\tau_{\Sigma D}$ ,  $g_{\Sigma D}$  — соответственно направление и модуль полного (суммарного) градиента в некоторой точке  $N$ -фокусного эллипса.

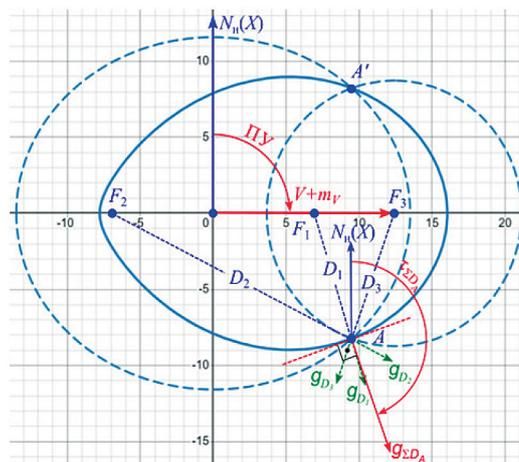


Рис. 2. Трехфокусный эллипс ЗНБ судна, градиенты, условия построения:

$A, A'$  — точки на  $3x$ -фокусном эллипсе ЗНБ, полученные от пересечения  $i$ -го софокусного ( $F_1, F_2$ ) двухфокусного эллипса с окружностью из ( $F_3$ ) радиуса  $D_3$ ;  $D_1, D_2, D_3$  — дистанции от соответствующих фокусов до точки трехфокусного эллипса ЗНБ;  $g_{D1}, g_{D2}, g_{D3}$  — градиенты для соответствующих дистанций в точке  $A$ ;  $\tau_{\Sigma DA}, g_{\Sigma DA}$  — соответственно направление и модуль полного (суммарного) градиента в точке  $A$

Для решения различных задач обеспечения безопасности судовождения необходимо разработать принципы управления  $N$ -фокусным эллипсом ЗНБ первоначально на кинематическом уровне. В этой связи базовой (исходной) задачей является определение позиций особых «характерных» точек на границе ЗНБ в геометрической взаимосвязи положения на плоскости судна, НО (рис. 3 точка  $C$ ) и их текущих / мгновенных параметров движения. Предлагается рассмотреть обобщенный метод решения поставленной задачи на примере трехфокусного эллипса ЗНБ для следующих точек (см. рис. 3): ближайшая —  $K$ , пересечение с ЛЮД —  $L$ , «крайние» (граничные):  $E_1, E_2$ , через которые проходят касательные к контуру ЗНБ из НО, рассматриваемой в виде точки  $C$ .

Данная задача не является тривиальной ввиду нелинейности уравнения  $N$ -фокусного эллипса ЗНБ (4) и вариации его размеров и формы, что вызвано изменением координат «подвижных» фокусов в процессе движения собственного судна. Предлагается решение, основанное на принципах разработанного В. В. Каврайским<sup>1</sup> обобщенного метода линий положения (ЛП), представленное в общем виде в векторно-матричной форме:

<sup>1</sup> Каврайский В. В. Избранные труды. Т. 1: Астрономия и геодезия / В. В. Каврайский. М.: Изд. УНГС ВМФ, 1956. 358 с.

$$A\Delta X = L; \quad \Delta X = A^{-1}L;$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \cos \tau_1 & \sin \tau_1 \\ \cos \tau_2 & \sin \tau_2 \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\Delta X$  — матрица-столбец неизвестных координат искомых точек  $(\Delta x, \Delta y)$ ;

$A$  — матрица коэффициентов системы уравнений (проекции градиентов на координатные оси);

$L$  — матрица-столбец свободных членов (эквивалентных переносам ЛП);

$\tau_i$  — направления градиентов.

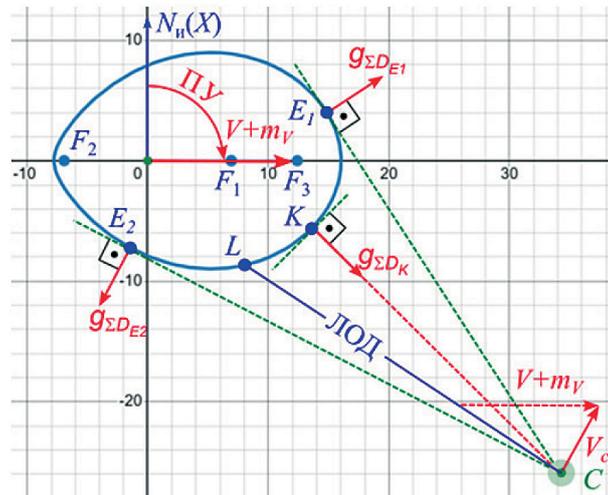


Рис. 3. Характерные точки трехфокусного эллипса ЗНБ судна:

$C$  — позиция НО с вектором скорости ( $V_c$ ) относительно грунта;

$K$  — ближайшая к НО точка на границе ЗНБ;  $L$  — точка пересечения ЛОД

с границей ЗНБ («контакт» (нарушение установленных условий безопасности (4))

при сохранении текущих параметров движения судна и цели);  $E_1, E_2$  — «крайние» точки на ЗНБ

Принципиально метод решения [8] соответствует используемому в судовождении методу ОМС по линиям положения, поэтому его легко адаптировать под программное обеспечение современных навигационных комплексов. Кроме того, с увеличением количества фокусов эллипса, например, для более точной аппроксимации (представления) ЗНБ предлагаемый принцип решения не изменится.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Известно [17]–[22], что координаты (географические или полярные) целей (НО) в практике судовождения могут быть получены по данным, например РЛС–САРП, АИС и т. п. Поскольку при автоматическом сопровождении РЛС–САРП определяет координаты одной точки (центр пятна радиолокационного отображения отметки) цели, при измерениях вручную снимается пеленг и дистанция (полярные координаты) также до одной точки ориентира (объекта), АИС выдает координаты местоположения антенны ГНСС (точки) судна-цели и в дальнейшем расчеты выполняются до некоторой точки НО — цели.

В случае, когда требуется определить координаты ближайшей относительно НО точки на границе  $N$ -фокусного эллипса ЗНБ судна, предлагается последовательность, поясняемая на рис. 4:

– по известным выражениям находят направления и дистанции от всех  $N$  фокусов ЗНБ до НО, принятой за точку (см. рис. 4, точка  $C$ );

– рассчитывается сумма дистанций  $\sum_{i=1}^N D_C$ , направление  $\tau_{\Sigma D_C}$  и модуль  $g_{\Sigma D_C}$  полного (суммарного) градиента (7) для  $N$ -фокусного эллипса, софокусного ЗНБ, но проходящего через НО (точка  $C$ );

– по текущим параметрам безопасности ЗНБ (выражения (4), (5)) оценивается отличие суммы дистанций  $\sum_{i=1}^N D_c$  от  $a_N$ , имеющее смысл разницы навигационных параметров в теории ОМС:

$$\sum_{i=1}^N D_c - a_N; \quad (9)$$

– принимается следующее допущение: направления и модули градиентов в точках  $K$  и  $C$  (см. рис. 3 и 4), через которые проходят разные софокусные  $N$ -фокусные эллипсы, один из которых аппроксимирует ЗНБ и проходит через точку  $K$ , другой — через точку  $C$ , практически совпадают:

$$\begin{aligned} \tau_1 = \tau_{\Sigma D_c}; \quad \tau_2 = \tau_1 + 90^\circ = \tau_{\Sigma D_c} + 90^\circ (0^\circ \leq \tau_2 \leq 360^\circ); \\ l_1 = 0; \quad l_2 = \frac{\sum_{i=1}^N D_c - a_N}{g_{\Sigma D_c}}. \end{aligned} \quad (10)$$

В этом случае матрицы коэффициентов системы уравнений (8) и свободных членов, ввиду ортогональности направления градиента в любой точке  $N$ -фокусного эллипса и касательной в этой же точке, примут вид (см. рис. 3 и 4):

$$A = \begin{bmatrix} \cos \tau_{\Sigma D_c} & \sin \tau_{\Sigma D_c} \\ -\sin \tau_{\Sigma D_c} & \cos \tau_{\Sigma D_c} \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N D_c - a_N}{g_{\Sigma D_c}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Далее решается система уравнений вида (8) с учетом (11), т. е. находится точка пересечения двух ортогональных линий (направления градиента  $g_{\Sigma D_c}$  и касательной к  $N$ -фокусному эллипсу (ЗНБ)) — см. рис. 4, точка  $K'$ .

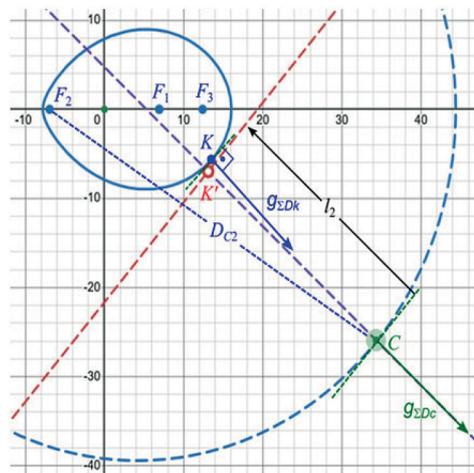


Рис. 4. Результаты моделирования поиска ближайшей точки на ЗНБ:

$K$  — ближайшая к НО точка на ЗНБ;  $K'$  — точка, полученная после первой итерации (приближения);

$g_{\Sigma D_c}, g_{\Sigma D_K}$  — градиенты софокусных  $N$ -фокусных эллипсов в точке  $C$  и  $K$  соответственно

Полученные координаты точки  $K'$ , учитывая методические погрешности, вызванные линеаризацией и отличием в общем случае как направления, так и модуля градиента в точках  $C$  и искомой  $K$  для софокусных  $N$ -фокусных эллипсов, принимаются за исходные и последовательность повторяется до тех пор, пока, например, не будут одновременно выполнены следующие условия:

$$\sum_{i=1}^N D_c - a_N \leq \min; \quad \wedge \quad \tau_{\Sigma D_K} - \tau_{\Sigma D_{K'}} \leq \min. \quad (12)$$

Поиск крайних точек ( $E_1, E_2$  (см. рис. 3)) на границе ЗНБ предлагается начинать согласно процедуре, аналогичной поиску ближайшей точки, рассмотренной ранее, но для первоначального расчета координат точки, находящейся внутри  $N$ -фокусной ЗНБ, близкой к ее геометрическому центру (точка  $O'$  рис. 5) и расположенной на направлении градиента  $\tau_{\Sigma 3DC}$  в точке  $C$  (см. формулу (10)). Следовательно, для получения координат точки  $O'$  при решении системы уравнений (8) необходима корректировка матрицы свободных членов:

$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N D_c}{g_{\Sigma D_c}} \end{bmatrix}.$$

После решения системы уравнений вида (8) от полученной точки (точка  $O'$  рис. 5) на направлениях, близких к направлениям градиентов в крайних точках ( $E_1, E_2$ , см. рис. 3 и 5)  $N$ -фокусного ЗНБ, находятся промежуточные точки (см. рис. 5 точки  $E'_1, E'_2$ ), а именно:

– определяются по известным выражениям направления и дистанции от всех  $N$  фокусов ЗНБ до точки  $O'$  (см. рис. 5);

– рассчитывается сумма дистанций  $\sum_{i=1}^N D_{O'}$  от точки  $O'$  до  $N$  фокусов ЗНБ и ее отличие от принятых параметров безопасности  $N$ -фокусного эллипса ЗНБ (выражения (4), (5)) — приближенные направления градиентов:

$$\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N; \quad (13)$$

$$\tau_1 = \tau_{\Sigma D_c} \pm \beta; \quad \tau_2 = \tau_{\Sigma D_c};$$

$$\beta = \arccos \left( \frac{\left( \sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N \right) g_{\Sigma D_c}}{g_{\Sigma 3D_{O'}} \sum_{i=1}^N D_c} \right); \quad (14)$$

$$l_1 = 0; \quad l_2 = \frac{\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N}{g_{\Sigma D_{O'}}}.$$

Тогда матрицы коэффициентов системы уравнений (8) и свободных членов примут вид:

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\tau_{\Sigma D_c} \pm \beta) & \sin(\tau_{\Sigma D_c} \pm \beta) \\ \cos(\tau_{\Sigma D_c}) & \sin(\tau_{\Sigma D_c}) \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N}{g_{\Sigma D_{O'}}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

после чего решается система уравнений вида (8) с учетом (15), т. е. находятся точки пересечения линий под углом  $\beta$  (см. рис. 5, точки  $E'_1, E'_2$ ).

Полученные координаты точек  $E'_1, E'_2$ , учитывая методические погрешности из-за линейризации уравнений и отличия в общем случае как направлений, так и модулей градиентов, согласно выражению (13), от искомым в точках  $E_1, E_2$  для софокусных  $N$ -фокусных эллипсов, целесообразно принять за исходные и последовательность повторить до тех пор, пока, например, одновременно не будут соблюдены условия:

$$\sum_{i=1}^k D_E - a_N \leq \min; \quad \wedge \quad \tau_{\Sigma DE} - \text{ИП}_{CE} \pm 90^\circ \leq \min. \quad (16)$$

Таким образом, для «крайних» точек  $E_1, E_2$  контура  $N$ -фокусной ЗНБ должны соблюдаться следующие условия: сумма дистанций до всех  $N$  фокусов стремится к  $a_N$  и направление касательной из точки  $C$  к контуру  $N$ -фокусной ЗНБ (ИП из точки  $C$  на любую «крайнюю» точку  $E$ ) ортогонально направлению градиента в соответствующих крайних точках  $E_1, E_2$  (рис. 5).

Поиск точки пересечения  $N$ -фокусной ЗНБ с ЛОД (точка, в которой произойдет нарушение предустановленных условий безопасности  $a_N$  по формуле (4), т. е. условие контакта точки  $C$  (НО) с ЗНБ при неизменных параметрах движения собственного судна и цели предлагается выполнять

аналогично алгоритму поиска ближайшей к НО (точка  $C$ ) точки на  $N$ -фокусной ЗНБ при соответствующей корректировке матрицы коэффициентов системы уравнений вида (8) путем замены направлений градиентов на направление ЛОД, которое можно получить, например, с помощью известного решения векторного скоростного треугольника [17]–[22], а именно:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \tau_{\text{ЛОД}} & \sin \tau_{\text{ЛОД}} \\ -\sin \tau_{\text{ЛОД}} & \cos \tau_{\text{ЛОД}} \end{bmatrix}.$$

Решение (пересечение ЛОД с границей ЗНБ) существует при следующем условии: направление ЛОД лежит в пределах направлений (сектора), см. рис. 3, образованного касательными, проведенными из точки  $C$  к контуру  $N$ -фокусной ЗНБ.

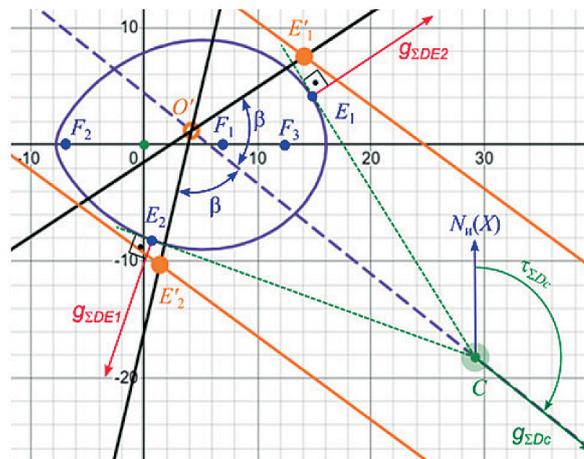


Рис. 5. Результаты моделирования поиска «крайних» точек на ЗНБ:

$E_1, E_2$  — крайние точки контура ЗНБ,  $E'_1, E'_2$  — крайние точки, полученные после первой итерации;  $g_{\Sigma DE_1}, g_{\Sigma DE_2}, g_{\Sigma Dc}$  — градиенты софокусных  $N$ -фокусных эллипсов в точках  $E_1, E_2, C$  соответственно

В случаях, когда ЛОД не находится в границах сектора, образованных этими касательными, предустановленные условия безопасности не будут нарушены при неизменности кинематических параметров движения как собственного судна, так и объекта (цели), т. е. расхождение произойдет на безопасном расстоянии.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение  $N$ -фокусного эллипса ЗНБ позволит решать всевозможные задачи оптимизации процесса управления судном, в которых, как правило, необходимы операции дифференцирования, что возможно, если уравнения модели ЗНБ непрерывны.

2. Для принятия решения по управлению конфигурацией  $N$ -фокусного эллипса ЗНБ необходимо оценить положения особых «характерных» точек на ЗНБ: ближайшей и крайних, расположенных на пересечении границы ЗНБ с ЛОД. Расчет координат прямых, обратных направлений и дистанций от этих точек до НО, не является тривиальной задачей в силу нелинейности уравнения  $N$ -фокусного эллипса, аппроксимирующего ЗНБ, вариативности формы и размеров в зависимости от текущих условий плавания (например, при изменении кинематических параметров движения судна от воздействий гидрометеорологического характера). Предлагается обобщенный метод решения, не зависящий от количества фокусов эллипса, аппроксимирующего ЗНБ, аналогичный традиционно используемому в судовождении и основанному на линейризации изолиний навигационных параметров, поэтому его реализация в современных навигационных комплексах не вызовет особых сложностей. Результаты компьютерного моделирования, представленные в форме рисунков, подтверждают правомерность выводов и алгоритмов.

3. Более глубоким исследованиям подлежит проблема выбора количества и наилучшего сочетания расположения подвижных фокусов  $N$ -фокусного эллипса ЗНБ от условий плавания, оптимального управления перемещением точек контакта ЗНБ с НО (например, точки  $L$ , см. рис. 3) в виде выработки на первом этапе рекомендованного вектора движения, а в дальнейшем — силовых воздействий на органы управления судном с учетом различного рода ограничений.

4. Особая перспективность единообразных технологий аппроксимации границ НО, формализации ЗНБ  $N$ -фокусными кривыми, в частности эллипсами, и разработка принципов управления прогнозируется для автономного судовождения в прибрежных, портовых условиях плавания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васьков А. С.* Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1(61). — С. 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036. — EDN OOIQL.

2. *Васьков А. С.* Методологические основы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности: спец. 05.22.16: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / А. С. Васьков. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 1998. — EDN ZJKICF.

3. *Васьков А. С.* Модель многофокусного эллипса зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 4–1(66). — С. 259–266. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.031. — EDN RNFIUG.

4. *Егоров И. Б.* Концепция зон навигационной безопасности и её применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3(69). — С. 13–17. — EDN PASLDR.

5. *Пашенцев С. В.* Построение зоны навигационной безопасности объекта и его кинематических характеристик на основе обсервации двух разнесенных точек объекта / С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2000. — Т. 3. — № 1. — С. 13–16. — EDN IYANV.

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

7. *Швецова А. Ф.* Концепция зоны навигационной безопасности: формирование и этапы развития / А. Ф. Швецова, А. А. Лентарев // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады науч.-практ. конф. — 2017. — Т. 1. — С. 123–132. — EDN YXOSXT.

8. *Dinh G. H.* The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area / G. H. Dinh, N.-K. Im // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 97–108. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.009.

9. *Lee H.-J.* Seafarers' awareness-based domain modelling in restricted areas / H.-J. Lee, Y. Furukawa, D.-J. Park // Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 5. — Pp. 1172–1188. DOI: 10.1017/S0373463321000394.

10. *Liu D.* Research on Dynamic Quaternion Ship Domain Model in Open Water Based on AIS Data and Navigator State / D. Liu, Z. Zheng, Z. Liu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Vol. 12. — Is. 3. DOI: 10.3390/jmse12030516.

11. *Pietrzykowski Z.* Effective ship domain — Impact of ship size and speed / Z. Pietrzykowski, M. Wielgosz // Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 219. — Pp. 108423. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108423.

12. *Rawson A.* Developing contextually aware ship domains using machine learning / A. Rawson, M. Brito // Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 3. — Pp. 515–532. DOI: 10.1017/S0373463321000047.

13. *Szlapczynski R.* Review of ship safety domains: Models and applications / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 145. — Pp. 277–289. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.020.

14. *Zhang F.* A Spatiotemporal Statistical Method of Ship Domain in the Inland Waters Driven by Trajectory Data / F. Zhang, X. Peng, L. Huang, M. Zhu, Y. Wen, H. Zheng // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. — Is. 4. DOI: 10.3390/jmse9040410.

15. *Wielgosz M.* The ship domain in navigational safety assessment / M. Wielgosz, Z. Pietrzykowski // PLOS ONE. — 2022. — Vol. 17. — Is. 4. — Pp. 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0265681.

16. Wang Z. Risk Identification Method for Ship Navigation in the Complex Waterways via Consideration of Ship Domain / Z. Wang, Y. Wu, X. Chu, C. Liu, M. Zheng // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11. — Is. 12. DOI: 10.3390/jmse11122265.

17. 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.

18. Дмитриев С. П. Синтез безопасных траекторий расхождения судов с использованием методов искусственного интеллекта / С. П. Дмитриев, Н. В. Колосов, А. В. Осипов // *Судостроение*. — 2000. — № 3(730). — С. 39–42. — EDN HYSLXB.

19. Корнев А. С. Использование решения задачи “машины Дубинса” для исключения ситуации опасного сближения двух судов / А. С. Корнев, С. П. Хабаров, А. Г. Шпекторов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2022. — № 2–1(56). — С. 127–135. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.017. — EDN RUZNZC.

20. Кургузов С. С. Определение реальной дистанции расхождения судов по информации АИС / С. С. Кургузов, М. П. Хаджинов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2009. — № 2(56). — С. 31–33. — EDN KVEWRF.

21. Некрасов С. Н. Вычисление гарантированного курса расхождения при опасности сближения вплотную / С. Н. Некрасов, Д. В. Трененков, К. И. Ефимов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 1(29). — С. 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15. — EDN TKJMTZ.

22. Пелевин А. Е. Гарантированная оценка зоны допустимого сближения судов в море / А. Е. Пелевин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 823–830. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830. — EDN SOEIYS.

## REFERENCES

1. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. “The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems.” *Morskie intelektual'nye tekhnologii* 3–1(61) (2023): 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.

2. Vas'kov, A. S. Metodologicheskie osnovy upravleniya dvizheniem sudna i konfiguratsiyey zony navigatsionnoy bezopasnosti: spetsial'nost' 05.22.16. Grand PhD diss. Sankt-Peterburg, 1998.

3. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. “The multifocal ellipse ship's domain model.” *Morskie intelektual'nye tekhnologii* 4–1(66) (2024): 259–266. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.031.

4. Egorov, I. B. and V. A. Loginovskiy. “Review of ship domain concept and it's application in navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 13–17.

5. Pashentsev, S. V. «Postroenie zony navigatsionnoy bezopasnosti ob'ekta i ego kinematicheskikh kharakteristik na osnove observatsii dvukh raznesennykh toчек ob'ekta.» *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3.1 (2000): 13–16.

6. Smolentsev, S. V., A. E. Filyakov and D. V. Isakov. “Adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940.

7. SHvetsova, A. F. and A. A. Lentarev. “Kontseptsiya zony navigatsionnoy bezopasnosti: formirovanie i etapy razvitiya.” *Transport Problems of The Far East. Proceedings of The Scientific and Practical Conference* 1 (2017): 123–132.

8. Dinh, G. H. and N.-K. Im. “The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 4 (2016): 97–108. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.009.

9. Lee, H.-J., Y. Furukawa and D.-J. Park. “Seafarers' awareness-based domain modelling in restricted areas.” *Journal of Navigation* 74.5 (2021): 1172–1188. DOI: 10.1017/S0373463321000394.

10. Liu, D., Z. Zheng and Z. Liu. “Research on Dynamic Quaternion Ship Domain Model in Open Water Based on AIS Data and Navigator State.” *Journal of Marine Science and Engineering* 12.3 (2024). DOI: 10.3390/jmse12030516.

11. Pietrzykowski, Z. and M. Wielgosz. “Effective ship domain — Impact of ship size and speed.” *Ocean Engineering* 219 (2021): 108423. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108423.

12. Rawson, A. and M. Brito. “Developing contextually aware ship domains using machine learning.” *Journal of Navigation* 74.3 (2021): 515–532. DOI: 10.1017/S0373463321000047.

13. Szlapczynski, R. and J. Szlapczynska. “Review of ship safety domains: Models and applications.” *Ocean Engineering* 145 (2017): 277–289. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.020.
14. Zhang, F., H. Zheng, et al. “A Spatiotemporal Statistical Method of Ship Domain in the Inland Waters Driven by Trajectory Data.” *Journal of Marine Science and Engineering* 9.4 (2021). DOI: 10.3390/jmse9040410.
15. Wielgosz, M. and Z. Pietrzykowski. “The ship domain in navigational safety assessment.” *PLOS ONE* 17.4 (2022): 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0265681.
16. Wang, Z., M. Zheng, et al. “Risk Identification Method for Ship Navigation in the Complex Waterways via Consideration of Ship Domain.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.12 (2023). DOI: 10.3390/jmse11122265.
17. Grinyak, V. M. and A. S. Devyatisil’nyi. “Fuzzy collision avoidance system for ships.” *Journal Of Computer And Systems Sciences International* 2 (2016): 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078.
18. Dmitriev, S. P., N. V. Kolosov and A. V. Osipov. “Synthesis of safe passing trajectories, using artificial intelligence methods.” *Shipbuilding* 3(730) (2000): 39–42.
19. Korenev, A. S., S. P. Khabarov and A. G. Shpektorov. “Application of the dubins path problem to avoid the dangerously close approach of two vessels.” *Morskie intelektual’nye tekhnologii* 2–1(56) (2022): 127–135. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.017.
20. Kurguzov, S. S. and M. P. Khadzhinov. “Defining the real distance for prevention of ships collisions under the ais information.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(56) (2009): 31–33.
21. Nekrasov, S. N., D. V. Trenenkov and K. I. Efimov. «Vychislenie garantirovannogo kursa raskhozhdeniya pri opasnosti sblizheniya vplotnyu.» *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 1(29) (2015): 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15.
22. Pelevin, A. E. “Guaranteed estimation of ships’ domains.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 11.5 (2019): 823–830. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Мироненко Александр Анатольевич** —  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: alex\_mironenko@mail.ru,  
mironenkoaa@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mironenko, Aleksandr A.** —  
Dr. of Technical Sciences, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: alex\_mironenko@mail.ru,  
mironenkoaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 марта 2025 г.  
Received: Mar. 24, 2025.

## MODELING OF BULK CONTAINER HANDLING SCHEMES AT A MARINE TERMINAL

**O. A. Izotov**

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

*The research addresses a comprehensive assessment of effective supply chain management for bulk cargoes transported in heavy-duty containers to marine container terminals for accumulation and shipment to sea vessels. The relevance of the topic arises from the fact that containerization, which has widely covered various cargo categories, has largely overlooked massive, relatively inexpensive bulk cargoes. These are successfully transported using soft, light-duty containers that require indoor storage facilities, which container terminals typically lack. The task is conditioned by the need to synchronize logistics flows, since managing the terminal's functional scheme demands a systematic approach to developing a model for the movement of adjacent transport modes, setting the rhythm for the delivery of trucks and railcars for unloading and loading, and considering several other factors. It is emphasized that modeling container handling schemes at a marine terminal directly depends on its throughput, which is calculated based on the port's storage area capacity — within which a certain number of containers can be accepted for processing and storage — and the availability of mechanization equipment required for their handling. This paper considers the possibility of organizing the terminal's technological processes based on reducing container storage space under various operating conditions of the transport system, specifically during vessel loading delays caused by meteorological or other reasons. In conclusion, the proposed container handling schemes can help reduce costs for transport process participants, maintain the set deadlines for cargo receipt and processing, and ensure the rhythm and reliability of technological operations at marine terminals.*

*Keywords: marine container terminal, container handling scheme, bulk cargoes, cargo accumulation at terminal, container technologies, transport systems, transshipment processes, ship handling.*

**For citation:**

Izotov, Oleg A. "Modeling of bulk container handling schemes at a marine terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 331–339. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-331-339.

**УДК 656.073.7**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ОБРАБОТКИ НАСЫПНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ НА МОРСКОМ ТЕРМИНАЛЕ

**О. А. Изотов**

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

*Темой исследования является всесторонняя оценка эффективного управления цепями поставок насыпных грузов в большегрузных контейнерах на морские контейнерные терминалы в целях накопления и отгрузки на морские суда. Актуальность темы вызвана тем, что контейнеризация широко охватившая различные категории грузов, оставила без внимания массовые относительно недорогие насыпные грузы, для перевозки которых успешно используются мягкие контейнеры малой грузоподъемности, требующие для хранения крытых помещений, которыми, как правило, контейнерные терминалы не оборудуются. Отмечается, что постановка задачи обусловлена необходимостью синхронизации логистических потоков, в силу того что управление функциональной схемой терминала требует системного подхода к разработке модели движения смежных видов транспорта, задания ритма подачи автомобилей и вагонов под выгрузку и погрузку и учета ряда других факторов. Подчеркивается, что моделирование схем обработки контейнеров на морском терминале находится в прямой зависимости от его пропускной способности, расчет которой базируется на оценке емкости складских площадей порта, в границах которых может быть принято к обработке и хранению определенное количество контейнеров, а также от наличия средств*

механизации, необходимых для их обработки. В предлагаемой работе рассмотрена возможность организации технологических процессов терминала на основе сокращения контейнеро-мест в зоне хранения в различных условиях работы транспортной системы, а именно в условиях задержки судна под погрузкой в силу метеорологических или иных причин. Сделан вывод о том, что предлагаемые схемы обработки контейнеров могут способствовать сокращению издержек участников транспортного процесса, не нарушая заданных сроков поступления и обработки грузов, обеспечивая ритмичность и надежность технологических операций на морском терминале.

*Ключевые слова:* морской контейнерный терминал, схема обработки контейнеров, насыпные грузы, накопление грузов на терминале, контейнерные технологии, транспортные системы, перегрузочные процессы, обработка судна.

**Для цитирования:**

Изотов О. А. Моделирование схем обработки насыпных контейнеров на морском терминале / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 331–339. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-331-339. — EDN DNSARN.

### **Введение (Introduction)**

Формирование стабильных и устойчивых технологических цепочек поставок товаров предполагает наличие стабильных экономических условий. При этом деловая среда, формирующаяся на текущий момент развития отношений с потенциальными заказчиками таких массовых грузов, как удобрения, может быть охарактеризована как высокорискованная и динамично изменяющаяся. В этих условиях строительство новых морских перегрузочных комплексов представляет препятствие для инвесторов, вынуждая производителей обратить внимание на имеющиеся в регионах портовые мощности и их возможности.

Основными условиями эффективного управления цепями поставок при этом становится достоверная и полная оценка возможностей видов транспорта, зон хранения и накопления грузов, а также гибкость и скорость реагирования на возможные отклонения от требуемых качественных показателей перевозки, включенных в систему доставки объектов и структур. В конечном итоге, по мнению ведущих логистов, именно в управлении материальными потоками сосредоточена вероятность снижения затрат и максимального использования производственных потенциалов изготовителей продукции и складских площадей [1].

Контейнеризация, охватившая различные категории грузов в силу сопровождающих такие перевозки экономических составляющих, до сих пор оставляет без должного внимания массовые относительно недорогие насыпные грузы, для перевозки которых успешно используются мягкие контейнеры малой грузоподъемности. Именно поэтому крупнотоннажные стальные насыпные контейнеры, как правило, используются для транспортировки руд редкоземельных металлов и иных ценных сыпучих грузов как в упаковке, так и без нее или в качестве средств перевалки (предварительного наполнения и последующего высыпания) грузов на морские суда с открытых площадок хранения (например, угля на контейнерном терминале в порту Усть-Луга).

*Целью исследования* является оценка возможности организации доставки в порт насыпных грузов в большегрузных контейнерах для накопления в них и последующей перегрузки целой судовой партией, которой не уделялось должного внимания до настоящего времени.

### **Материалы обсуждения (Methods and Materials)**

Эффективность работы морского контейнерного терминала зависит от его удаленности от центров образования грузопотоков, размеров и транспортной доступности его складских площадей, производительности перегрузочных средств, применения рациональных схем перемещения и современных технологий обработки контейнеров и других факторов. При этом синхронизация логистических потоков и управление функциональной схемой терминала требуют системного подхода к разработке модели движения смежных видов транспорта, задания ритма подачи автомобилей и вагонов под выгрузку и погрузку и т. д. [2]. В целом пропускная способность контейнер-

ного терминала зависит от емкости складских площадей, для которых выполняется расчет принимаемого к обработке и хранению количества контейнеров, а также мощностей, необходимых для их обработки средств механизации.

Уровень организации технологических процессов определяет сроки накопления на терминале судовой партии контейнеров, подлежащих отгрузке, определяет зоны проведения таможенного контроля, растарки и хранения порожних контейнеров и проведения вспомогательных операций. Таким образом, классическая схема обработки контейнеровозов на морском терминале требует организации двух складских площадок: для партии отгружаемых контейнеров и для партии выгружаемых контейнеров [3], [4]. Формирование на причале складских площадей заданных параметров при обработке нетрадиционного для контейнерного терминала, подаваемого для перегрузки в конвейеризованном виде груза, может быть организовано аналогичным образом (рис. 1).

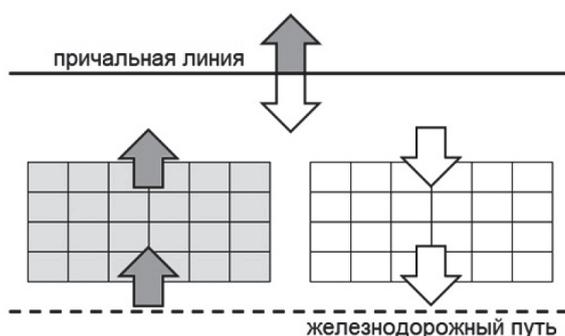


Рис. 1. Традиционная схема размещения и оборота контейнеров на морском терминале:

■ — контейнеры с грузом; □ — порожние контейнеры

В результате могут быть заданы очередность завоза и вывоза насыпных контейнеров на терминал и общий ритм обработки, например, шестью кольцевыми контейнерными поездами, курсирующими между заводом производителем и морским терминалом, что соответствует периоду судозаходов, составляющему шесть суток (табл. 1).

Таблица 1

**Движение насыпных контейнеров на морском терминале<sup>1</sup>**

Сутки работы терминала	1	2	3	4	5	6
Количество контейнеров на складе:	560	560	560	560	560	560
с грузом	0	112	224	336	448	560
без груза	560	448	336	224	112	0

При объеме обработки, равном 560 контейнеров (шесть кольцевых контейнерных поездов по 112 контейнеров или 2016 т груза), для судна грузоподъемностью 12000 т с периодом захода один раз в 6 сут можно построить график оборота контейнеров на терминале (рис. 2) [5]. При этом организация доставки на морской терминал насыпных контейнеров с удобрениями для накопления необходимой партии и последующего высыпания груза из контейнеров в трюмы судна при обеспечении должной координации действий участников процесса может осуществляться на основе более реалистичных оценок внешних факторов [6], [7].

Учитывая интенсивность входящего и исходящего потоков (112 контейнеров в сут в обоих направлениях), при обработке однородных насыпных грузов, не требующих номерного учета движения контейнеров, можно организовать иную схему их складирования и движения на морском терминале и добиться сокращения необходимого количества контейнеро-мест для их хранения (рис. 3).

<sup>1</sup> Оценка движения насыпных контейнеров на заводе производителя не требуется, поскольку контейнеры сразу подаются под погрузку по мере их поступления без снятия с железнодорожных платформ.

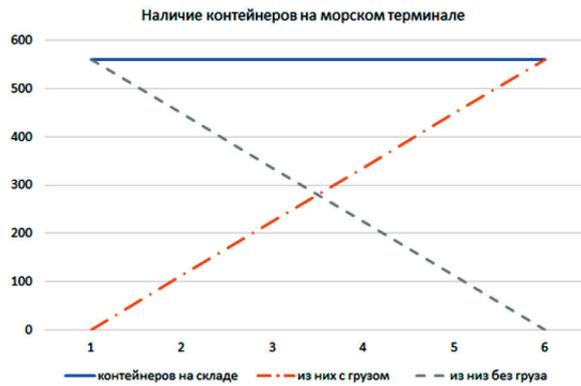


Рис. 2. Оборот контейнеров на морском терминале при заданной ритмичной обработке судов

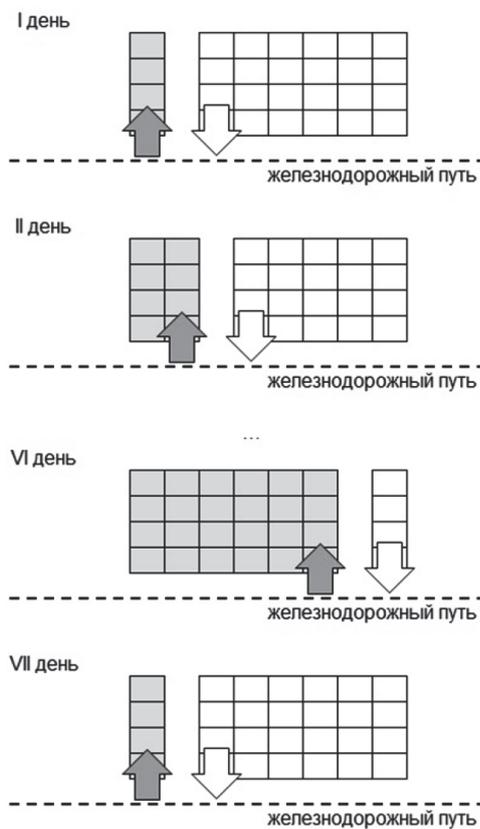


Рис. 3. Оборот насыпных контейнеров на морском терминале при заданной ритмичной обработке судов:  
■ — контейнеры с грузом; □ — порожние контейнеры

Размещение на терминале вместо 12 поездных партий (каждая по 112 контейнеров) только семи партий (седьмая партия контейнеров обеспечивает обратную загрузку контейнерного поезда порожними контейнерами) позволит сократить потребность в занимаемой площади на 42 %:

$$X = 100 - \frac{100P_7}{P_{12}}$$

Здесь  $X$  — сокращение площади, %;

$P_{12}$  — площадь, необходимая для хранения 12 поездных партий контейнеров;

$P_7$  — площадь, необходимая для хранения семи поездных партий<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Расчет выполнен без учета ярусности хранения грузеных и порожних контейнеров.

Ритмичность подачи грузопотока в интересах потребителя при этом сохраняется, поскольку каждый поезд без простоя будет загружен порожними контейнерами для подвоза через 6 сут очередной партии груза. При этом количество контейнеро-операций (коэффициент перевалки) не изменяется, и стоимость обработки контейнеров при этом не увеличивается:

$$K_{\text{пер}} = K_{\text{конт.-опер}}$$

Здесь  $K_{\text{пер}}$  — коэффициент перевалки;

$K_{\text{конт.-опер}}$  — количество контейнеро-операций, совершаемых с одним контейнером согласно следующей схеме механизации: вагон – склад; склад – судно – склад; склад – вагон.

Складская зона хранения контейнеров, участвующих в доставке и обработке удобрений на морском контейнерном терминале, обеспечит синхронизацию логистических потоков, не нарушая функциональной схемы управления грузопотоками на терминале.

### Результаты (Results)

С учетом того, что удобрения являются подверженным увлажнению режимным грузом, его обработка в порту при выпадении осадков приостанавливается. В этом случае требует отдельного учета возможная необходимость переноса сроков начала или окончания погрузки судна по метеорологическим причинам. В целях обеспечения обратной загрузки контейнерного поезда порожними контейнерами классической схемой работы терминала должна быть предусмотрена дополнительная зона хранения страховочного запаса контейнеров с грузом (например, трехдневного запаса<sup>3</sup>) — рис. 4. Соответственно изменится также очередность завоза (вывоза) насыпных контейнеров на терминал и общий ритм их обработки (табл. 2).

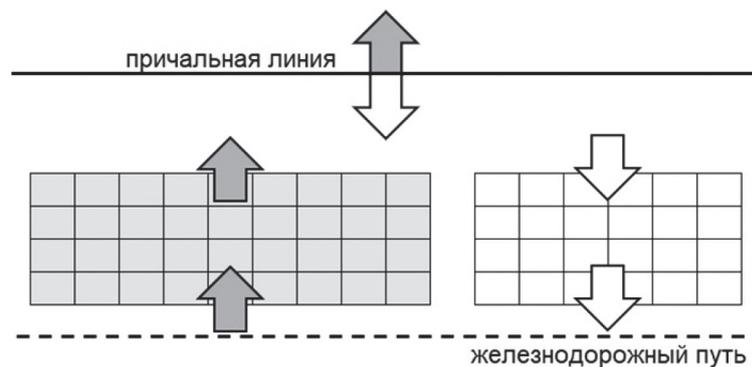


Рис. 4. Схема размещения и оборота контейнеров на морском терминале при наличии трехдневного страховочного запаса:

■ — контейнеры с грузом; □ — порожние контейнеры

Таблица 2

**Движение насыпных контейнеров на морском терминале при создании трехдневного запаса в случае задержки обработки судна по метеорологическим причинам**

Сутки работы терминала	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество контейнеров на складе:	896	896	896	896	896	896	896	896	896
с грузом	0	112	224	336	448	0	112	224	336
без груза	896	784	672	560	448	896	784	672	560

Объем отгрузки на морское судно останется прежним — груз из 560 контейнеров или 12000 т один раз в 6 сут, однако для ритмичности работы железнодорожного транспорта требуется увеличение количества контейнеров в обороте на кольцевых контейнерных поездах и площадь их хранения на терминале. Количество кольцевых контейнерных поездов при этом останется

<sup>3</sup> Зависит от региона расположения порта и времени года.

прежним [8]. График оборота контейнеров на терминале при наличии трехдневного страховочного запаса приведен на рис. 5. В этом случае организация доставки на морской терминал насыпных контейнеров может осуществляться в условиях сокращения потребности в площадях для их хранения<sup>4</sup>.

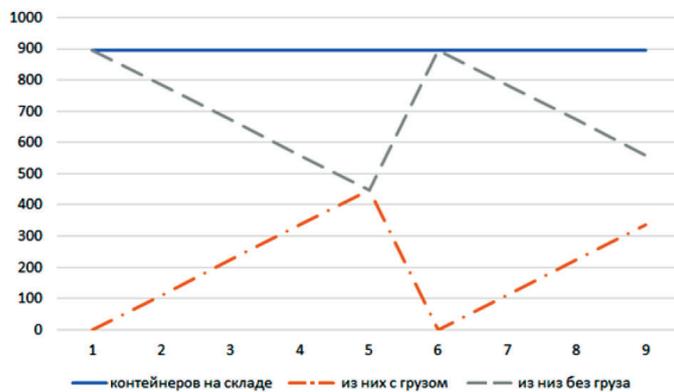


Рис. 5. Оборот контейнеров на морском терминале при создании трехдневного запаса

В результате можно организовать такую схему складирования и движения контейнеров на морском терминале, которая позволит добиться сокращения необходимого количества контейнеро-мест без нарушения общей технологии обработки грузопотоков и ритма работы порта (рис. 6).

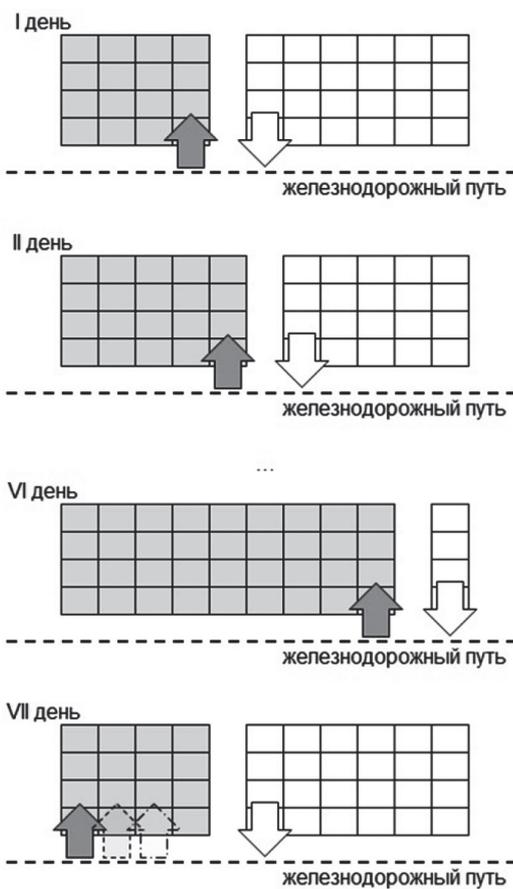


Рис. 6. Оборот насыпных контейнеров на морском терминале при наличии трехдневного запаса:  
 — контейнеры с грузом;  — порожние контейнеры

<sup>4</sup> СП 92.13330.2012. Склады сухих минеральных удобрений и химических средств защиты растений. СНиП II-108-78. Дата введ. 2013-01-01.

Размещение на терминале вместо 15 поездных партий (каждая из 112 контейнеров) только девяти партий позволит сократить потребность в занимаемой площади на 40 %:

$$X = 100 - \frac{100P_9}{P_{15}}.$$

Здесь  $P_{15}$  — площадь потребная для хранения 15 поездных партий контейнеров;

$P_9$  — площадь, необходимая для хранения девяти поездных партий при курсировании по железнодорожному маршруту только шести.

При этом вновь поступающая партия груженых насыпных контейнеров может выгружаться на площадки терминала с учетом необходимости обновления партии удобрений. Тем самым можно избежать эффекта «мертвого груза» (не обновляемого в штабеле хранения до особой необходимости в нем) в контейнерах, заложенных на хранение и не выбираемых в силу отсутствия в нем потребности<sup>5</sup> [9]. Ритмичность подачи грузопотока и количество контейнеро-операций (коэффициент перевалки) сохраняют свои показатели. Таким образом, можно оценить ритм работы терминала даже в случае задержки подачи судна под обработку, например, на двое суток (табл. 3, рис. 7).

Таблица 3

**Движение насыпных контейнеров на морском терминале при создании трехдневного запаса в случае задержки обработки судна по метеорологическим причинам при задержке подачи судна под погрузку сроком на два дня**

Сутки работы терминала	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество контейнеров на складе:	896	896	896	896	896	896	896	896	896
с грузом	0	112	224	336	448	560	672	224	336
без груза	896	784	672	560	448	336	224	672	560

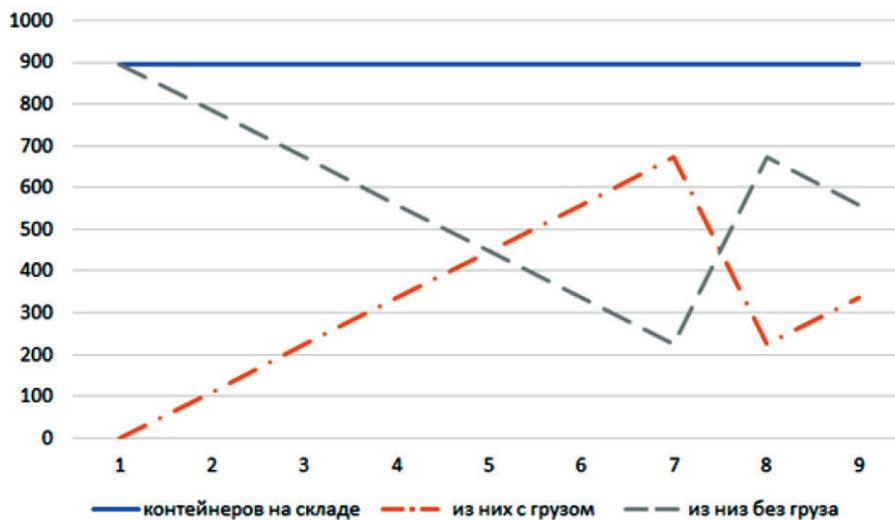


Рис. 7. Оборот контейнеров на морском терминале при наличии трехдневного запаса и задержке в подаче судна под обработку на два дня

Разработка моделей организации перегрузки насыпных грузов с использованием контейнеров в качестве средства доставки и хранения, а также как грузового устройства перевалки удобрений в трюмы судна позволяет сделать вывод о возможности повышения эффективности работы морского контейнерного терминала при работе с нетрадиционными грузами.

<sup>5</sup> СП 92.13330.2012. Склады сухих минеральных удобрений и химических средств защиты растений. СНиП II-108–78. Дата введения 2013–01–01.

### Заключение (Conclusion)

Организация перевалки насыпных грузов на морских контейнерных терминалах должна строиться на основе тех же логистических принципов, что и традиционные грузы: минимальные издержки участников транспортного процесса, соблюдение заданных сроков прохождения грузов на всех этапах его доставки, надежность принятых к транспортировке схем и сохранение качества груза [10]. Всем этим требованиям в полной мере отвечает контейнеризация насыпных грузов, следующих магистральными видами транспорта и задающих ритмичные и предсказуемые грузопотоки, поддающиеся повышению эффективности управления, в том числе в пунктах перевалки грузов.

Организация технологического процесса доставки и перевалки минеральных удобрений на основе применения большегрузных насыпных контейнеров призвана способствовать дальнейшему развитию внутренних контейнерных систем страны, открывающих новые перспективы построения логистических цепочек в условиях увеличения возможностей магистральных видов транспорта. Поддержание грузооборота морских контейнерных терминалов на уровне показателей, предусмотренных планами их строительства, позволит сократить возможные простои заложенного в них дорогостоящего оборудования в условиях сдерживания развития торгового оборота России со стороны стран, избравших курс на ограничение сотрудничества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шибзухов Т. А. Складская логистика: история, структура, проблемы и пути решения / Т. А. Шибзухов, К. Д. Савельева, Н. Л. Галиева, А. В. Еричев // Экономика и социум. — 2021. — № 6–2(85). — С. 660–669. DOI: 10.46566/2225-1545\_2021\_2\_85\_660. — EDN BIWWWH.
2. Турпищева М. С. Имитационная модель совместной работы железной дороги и портовых терминалов / М. С. Турпищева, А. С. Кожушко // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2008. — № 5(46). — С. 79–83. — EDN JTZTCF.
3. Полуботко Н. С. Технологические решения для увеличения производительности перевалки контейнеризированных навалочных грузов на морском терминале / Н. С. Полуботко // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности: материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов, Санкт-Петербург, 20–21 февраля 2025 года. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2025. — С. 232–235. — EDN ZWJUPC.
4. Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.
5. Изотов О. А. Обоснование возможности обработки контейнеризированных навалочных грузов на морском терминале / О. А. Изотов, Н. С. Полуботко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215. — EDN HRYNBC.
6. Гудков В. А. Логистические модели систем обработки грузовых контейнеров / В. А. Гудков, М. С. Турпищева, Е. Р. Нурғалиев // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2012. — № 2(54). — С. 13–17. — EDN PIUJRF.
7. Изотов О. А. Расчет количества насыпных контейнеров при организации перевалки навалочных грузов на неспециализированном причале / О. А. Изотов, А. В. Гультияев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1209–1216. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216. — EDN YLUFAS.
8. Антонова Е. И. Проблема организации грузовых работ на железной дороге контейнерного терминала / Е. И. Антонова, И. А. Васильев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2013. — № 3(174). — С. 67–74. — EDN QCXENV.
9. Николаева Н. В. Контроль содержания влаги в минеральных удобрениях при бестарном хранении и транспортировке / Н. В. Николаева, В. В. Соколов, И. А. Почиталкина // Успехи в химии и химической технологии. — 2017. — Т. 31. — № 6(187). — С. 135–137. — EDN ZTEWOF.

10. Пospelov A. M. К вопросу об управлении запасами парка контейнеров на контейнерных терминалах ОАО «РЖД» // Научно-практическая конференция «Неделя науки — 2007» — М.: МГУПС, 2007. — С. 79–84.

## REFERENCES

1. Shibzukhov, T. A., K. D. Savel'eva, N. L. Galieva and A. V. Elichev. "Warehouse logistics: history, structure, problems and solutions." *Ekonomika i sotsium* 6–2(85) (2021): 660–669. DOI: 10.46566/2225-1545\_2021\_2\_85\_660.
2. Turpischeva, M. S. and A. S. Kozhushko. "Simulation model of joint work of railway and port terminals." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University* 5(46) (2008): 79–83.
3. Polubotko, N. S. "Tekhnologicheskie resheniya dlya uvelicheniya proizvoditel'nosti perevalki konteynerizirovannykh navalochnykh грузов na morskome terminale." *Sovremennyye vyzovy transportnoy otrasli: novyye vozmozhnosti: materialy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii transportnykh vuzov, Sankt-Peterburg, 20–21 fevralya 2025 goda*. Moskva: Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya "Dashkov i K", 2025: 232–235.
4. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. "Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.
5. Izotov, O. A. and N. S. Polubotko. "Justification of the possibility of processing containerized bulk cargoes at a marine terminal." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215.
6. Gudkov, V. A., M. S. Turpischeva and E. R. Nurgaliev. "Logistic models of the systems of cargo containers' processing." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University* 2(54) (2012): 13–17.
7. Izotov, O. A. and A. V. Gul'tyaev. "The calculation of the number of bulk containers in the organization of transshipment of bulk cargoes at specialized berth." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1209–1216. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216.
8. Antonova, E. I. and I. A. Vasil'ev. "The problem of cargo operation management on container terminal railway." *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications And Control Systems* 3(174) (2013): 67–74.
9. Nikolaeva, N. V., V. V. Sokolov and I. A. Pochitalkina. "Control of moisture content in mineral fertilizers during bulk storage and transport." *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* 31.6(187) (2017): 135–137.
10. Pospelov, A. M. "On the issue of inventory management of the container fleet at the container terminals of JSC Russian Railways" *Scientific and practical conference "Week of Science — 2007"*. Moscow: MGUPS, 2007: 79–84.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Izotov, Oleg A.** —  
 Dr. of Technical Sciences, associate professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf\_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 01 апреля 2025 г.  
 Received: Apr. 1, 2025.

## COMPENSATION OF THE FIRST REVERSE PEAK OF THE HYDRODYNAMIC FORCE DURING FILLING OF THE LOCK CHAMBER WITH A HEAD SUPPLY SYSTEM

**K. P. Morgunov, V. G. Bogatyrev**

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

*This paper presents research aimed at studying the hydraulics of the filling process of navigation locks with a head supply system feeding from beneath flat lifting and lowering gates. In particular, the problem of compensating the first reverse peak of the hydrodynamic force by varying the area of the filling opening is considered. The change in the filling opening area was analyzed both for cases of constant size and for cases of reduction. In a theoretical experiment, the timing and intensity of the change in the filling opening area were synchronized with the wave propagation speed in the lock chamber. The first release wave formed at the start of filling must be compensated by a second wave, which is forcibly created by reducing the cross-sectional area of the filling opening, followed by its increase. The parameters of the second compensating wave were determined so that its interaction with the first release wave eliminates the first peak of the reverse hydrodynamic force. The mode of changing the filling opening area was also studied. To achieve this, theoretical methods based on solving unsteady water motion equations were used, allowing determination of free surface fluctuations in the lock chamber, including at the initial filling stage. The results show, for various vessel displacements, the dependence of hydrodynamic force magnitude on the modes of filling opening area change and on the related increment of water flow. The findings can help create safe locking conditions for both current and future unmanned vessels.*

*Keywords: navigation lock, filling hydraulics, head supply system, hydrodynamic force, wave oscillations, flow rate increment coefficient*

**For citation:**

Morgunov, Konstantin P. and V. G. Bogatyrev “Compensation of the first reverse peak of the hydrodynamic force during filling of the lock chamber with a head supply system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 340–349. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-340-349. — EDN EOKVWY.

**УДК 656.62.052.4**

## КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРВОГО ОБРАТНОГО ПИКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПРИ НАПОЛНЕНИИ КАМЕРЫ ШЛЮЗА С ГОЛОВНОЙ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ

**К. П. Моргунов, В. Г. Богатырёв**

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

*Исследования, представленные в работе, направлены на изучение гидравлики процесса наполнения судоходных шлюзов с головной системой питания из-под плоских подъемно-опускных ворот. В частности, рассмотрена задача о возможности компенсации первого обратного пика гидродинамической силы путем изменения площади отверстия наполнения. Изменение площади отверстия наполнения рассмотрено в том числе для случаев постоянной величины площади и для случаев ее уменьшения. В теоретическом эксперименте временной промежуток и интенсивность изменения площади отверстия наполнения синхронизировались со скоростью распространения волн в камере шлюза. Первую волну попуска от сформировавшегося в начале процесса наполнения необходимо компенсировать второй волной, которая создается принудительно путем уменьшения площади сечения отверстия наполнения с последующим переходом к ее увеличению. В исследовании определялись параметры второй компенсационной волны, чтобы при взаимодействии с первой волной попуска отсутствовал первый пик обратной гидродинамической силы. Исследовано также влияние на воз-*

никновение пика обратной силы режима изменения площади отверстия наполнения. Для реализации поставленной задачи использованы теоретические методы, основанные на решении уравнений неустановившегося движения воды, позволяющие определить колебания свободной поверхности воды в камере шлюза, в том числе на начальном этапе наполнения. Результаты, полученные в исследовании, показывают для различных водоизмещений судна зависимости изменения величины гидродинамической силы от режимов изменения площади отверстия наполнения и от взаимосвязанного с площадью изменения приращения расхода воды. Полученные результаты исследования могут быть направлены на создание безопасных условий для шлюзования как судов действующего флота, так и перспективного безэкипажного флота.

*Ключевые слова:* судоходный шлюз, гидравлика наполнения, головная система питания, гидродинамическая сила, волновые колебания, коэффициент приращения расхода, фронт волны.

**Для цитирования:**

Моргунов К. П. Компенсация первого обратного пика гидродинамической силы при наполнении камеры шлюза с головной системой питания / К. П. Моргунов, В. Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 340–349. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-340-349. — EDN EOKVWY.

### Введение (Introduction)

При наполнении (опорожнении) камер судоходных шлюзов шлюзующиеся суда испытывают гидродинамическое воздействие потока, обусловленное неустановившимся движением воды, которое изменяется как по величине, так и по направлению. Гидродинамическое воздействие потока на шлюзуемое судно наиболее значимо проявляется при наполнении (опорожнении) камер шлюзов с головной системой питания. При головной системе питания сосредоточенно поступающая в камеру вода движется от верхней головы к нижней в виде длинной пологой волны повышения уровня. Дойдя до нижней головы, фронт волны отражается от ее створа и начинает движение к верхней голове, отражается от нее и снова движется к нижней голове. Так волна движется в течение всего процесса наполнения, формируя несколько пиков силового воздействия на судно как в прямом, так и в обратном направлении.

Процессы наполнения и опорожнения камеры судоходных шлюзов достаточно изучены [1]–[3], однако степень изученности ограничивается условием, при котором шлюзующееся судно считается неподвижно закрепленным. В практике эксплуатации это реализуется закреплением судна швартовными канатами на специальных устройствах — плавучих рымах, либо вместо канатов могут использоваться автоматические швартовные устройства, также интегрированные с плавучими рымами [4]. Гидродинамическая нагрузка на судно передается на швартовные канаты и затем на плавучие рымы. Допустимая величина этой нагрузки ограничена усилиями, которые гарантированно могут выдержать швартовные канаты [5]–[8]. Однако для случаев шлюзования судов без использования швартовки [9] или шлюзования в условиях отрицательных температур [10], [11], когда использование плавучих рымов для швартовки невозможно ввиду их обмерзания, процессы гидродинамического воздействия на судно исследованы в гораздо меньшей степени.

Задачей настоящего исследования является определение условий, при которых уменьшается величина первого пика обратной гидродинамической силы, действующей на шлюзующееся судно на начальном этапе наполнения камеры, или такой пик обратной гидродинамической силы полностью исключается.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Величина полной продольной гидродинамической силы, действующей на судно при шлюзовании, может быть представлена в виде суммы:

$$P = P_{\text{в}} + P_{\text{с}} + P_{\text{м}},$$

где  $P_{\text{в}}$  — волновая составляющая силы, обусловленная движением в камере длинной волны малой амплитуды;

$P_{\text{с}}$  — составляющая, обусловленная скоростью течения воды в камере, вызывающая силу гидравлического сопротивления;

$P_m$  — местные силы (силы инерции), обусловленные неравномерностью распределения скоростей течения в камере.

Величина волновой составляющей гидродинамической силы главным образом зависит от водоизмещения судна  $W$  и уклона поверхности воды в камере  $i$  на участке, на котором расположено судно, и рассчитывается по формуле

$$P_b = Wi. \quad (1)$$

Величина скоростной составляющей гидродинамической силы, которая зависит от соотношения площади миделевого сечения судна  $\otimes$  и площади свободного живого сечения камеры  $\Omega_k$ , имеет наибольшие значения в начале наполнения.

В работе А. В. Михайлова [12] предложена формула для расчета гидродинамической силы от скоростного воздействия потока:

$$P_c = \left\{ \delta \varphi \otimes [1 + (m_c - 1)\alpha^2] + \frac{1}{3} \left( f \Omega_c + \frac{W}{C^2 R} \right) \right\} \left( \frac{Q}{\Omega_k - \otimes} \right)^2,$$

где  $\varphi$  — коэффициент остаточного сопротивления;

$\delta$  — коэффициент полноты водоизмещения;

$m_c$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей течения в месте поступления расхода воды в камеру;

$\alpha$  — коэффициент, учитывающий ограниченность водного пространства, в котором находится судно;

$f$  — коэффициент трения воды о корпус судна;

$\Omega_c$  — смоченная поверхность судна;

$W$  — водоизмещение судна;

$C$  — коэффициент Шези;

$R$  — гидравлический радиус свободной площади живого сечения в месте расположения судна;

$Q$  — расход воды в створе поступления.

Формула для расчета скоростной составляющей гидродинамического воздействия приведена также в работе [2]:

$$P_c = K \otimes \left( \frac{Q}{\Omega_k - \otimes} \right)^2 \left( 1 - \frac{l_n + \frac{1}{2} l_c}{L_k} \right)^2,$$

где  $K$  — коэффициент сопротивления  $\left( K = 0,15 - 0,20 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4} \right)$ ;

$l_n$  — расстояние от носа судна до створа поступления расхода;

$l_c$  — длина судна;

$L_k$  — длина камеры шлюза.

Местные силы, определяемые в основном инерционными явлениями, рассчитываются по формуле [2]:

$$P_m = K_n m_c \frac{d v_c}{dt},$$

где  $K_n$  — коэффициент, характеризующий силы инерции в долях от массы судна (по данным лабораторных исследований принимается приближенно  $K_n = 0,3$ );

$m_c$  — масса судна;

$v_c$  — скорость течения в створе расположения судна (посередине его длины).

Совместное воздействие трех составляющих гидродинамической силы может привести к максимальным значениям гидродинамической силы особенно на начальном этапе наполнения, когда скоростная составляющая  $P_c$  имеет наибольшие значения, что способствует неблагоприятным условиям стоянки особенно для судов, имеющих максимальные габариты и осадку.

Как показали исследования [2], волновая часть  $P_v$  является основной составляющей гидродинамической силы и ее величина в головных системах питания, даже оснащенных современными гасительными устройствами, может достигать 90–95 % от величины суммарной силы. Поэтому основной задачей гидравлических расчетов процесса наполнения судоходного шлюза с головной системой питания является установление параметров колебаний свободной поверхности воды в камере, которые зависят от габаритов шлюза, напора на камеру, характеристик системы наполнения, конструктивных особенностей системы гашения и скоростных режимов изменения площади отверстия наполнения. Из данных параметров в зависимости от длины судна и его расположения относительно полезной длины камеры определяется величина изменения уровня воды у носа и кормы судна (определяющая уклон) и волновая составляющая гидродинамической силы (формула (1)).

Для определения параметров колебания уровня свободной поверхности, в том числе на начальном этапе наполнения камеры шлюза с головной системой питания, используются уравнения неустановившегося движения воды:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial(v\Omega)}{\partial s} = 0; \\ \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial s} u + \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{v|v|}{C^2 R} - i = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Omega$  — площадь живого сечения потока;

$v$  — средняя скорость в сечении;

$t$  — время;

$s$  — координата вдоль потока;

$g$  — ускорение свободного падения;

$h$  — глубина потока;

$R$  — гидравлический радиус свободной площади живого сечения в месте расположения судна;

$C$  — коэффициент Шези;

$i$  — уклон дна.

Система уравнений (2) относится к классу гиперболических уравнений и не имеет решения в конечном виде. Для ее решения в исследованиях используется метод Галеркина, изложенный в работах [13], [14], при этом используется расчетная схема, предложенная А. В. Михайловым [12].

Процессы изменения положения свободной поверхности в камере шлюза носят колебательный характер и наиболее близко могут быть описаны с помощью теории длинных волн. Скорость распространения волны в камере шлюза без судна определяется по формуле Лагранжа:

$$C = \sqrt{g \frac{\Omega_k}{B_k}} = \sqrt{g s_{cp}},$$

где  $B_k$  — ширина камеры.

При расположении в камере судна скорость движения волны  $C_c$  в пределах судна уменьшается из-за стеснения площади живого сечения камеры его корпусом на величину  $\otimes$ :

$$C_c = \sqrt{g \frac{\Omega_k - \otimes}{B_k}}.$$

Таким образом, основной интерес представляет исследование начального этапа процесса наполнения камеры шлюза с головной системой питания, так как именно в это время формируются максимальные значения гидродинамической силы, действующей на шлюзующееся судно.

## Результаты (Results)

Характерный вид графиков изменения гидродинамической силы на начальном этапе шлюзования приведен на рис. 1.

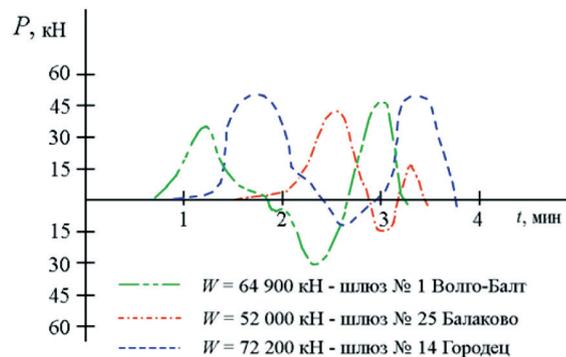


Рис. 1. Совмещенные графики гидродинамической силы, действующей на судно в начальный период при наполнении камеры шлюза с головной системой питания из-под плоских подъемно-опускных ворот

Как известно [13], [14], волновая составляющая гидродинамической силы зависит не от величины расхода воды  $Q$ , а от величины его приращения во времени  $\frac{dQ}{dt}$ . Это приращение имеет наибольшее значение в начальный период наполнения при наибольшем напоре на камеру — рис. 2 [2].

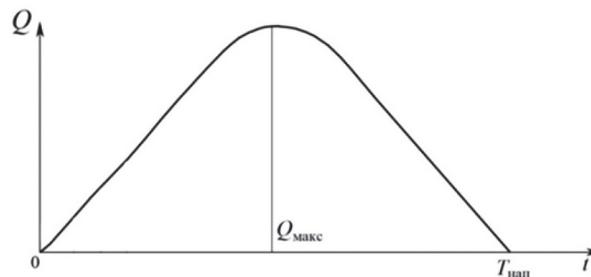


Рис. 2. График зависимости расхода от времени при наполнении камеры шлюза

В этот же период времени площадь живого сечения камеры наименьшая, так как уровень воды в ней соответствует уровню нижнего бьефа. Поэтому  $P_b$  имеет наибольшее значение в начальный период наполнения камеры при первом пробеге волны от верхней головы к нижней (первый пик).

Для анализа влияния изменения расхода на величину пика гидродинамической силы введем дополнительную характеристику — коэффициент приращения расхода, равный отношению положительного приращения расхода к его отрицательному приращению:

$$k_p = \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{пол}} : \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{отр}} .$$

Отрицательное приращение расхода на начальном этапе наполнения камеры может возникнуть в результате компенсации первого обратного пика гидродинамической силы путем как фиксации площади отверстия наполнения, так и его уменьшением.

При анализе влияния значения коэффициента приращения расхода на величину гидродинамического воздействия на судно были исследованы следующие области изменения коэффициента приращения расхода:

– первая область — результаты, полученные путем ограничения приращения расхода, поступающего в камеру шлюза, посредством кратковременного уменьшения площади сечения отверстия наполнения; при этом площадь уменьшается таким образом, что прирост расхода меньше его убывания, что характеризуется коэффициентом  $k_p < 1$ ;

– вторая область — результаты, полученные путем ограничения приращения расхода, поступающего в камеру шлюза, посредством фиксации площади сечения отверстия наполнения; фиксация площади происходит исходя из условия, что скорость прироста расхода равна или больше скорости его убывания, что характеризуется коэффициентом  $k_p \geq 1$ ;

– третья область — результаты, полученные для случая, когда площадь сечения отверстия наполнения медленно увеличивается; такой способ применяется при шлюзовании судна с его швартовкой к неподвижным рывам, коэффициент приращения  $k_p$  в этом случае не используется, так как убывания расхода на начальном этапе наполнения камеры шлюза не происходит.

Расчеты всех трех областей, результаты которых приведены на рис. 3, выполнялись с учетом следующих условий.

1. Величина первого пика прямой гидродинамической силы должна иметь максимально возможное значение при фиксированном положительном приращении поступающего расхода за минимально возможное общее время наполнения камеры шлюза.

2. Время изменения приращения расхода с положительного на отрицательное и обратно увязывается со скоростью распространения волн в камере шлюза. Компенсационная волна, создаваемая отрицательным приращением расхода с последующим его переходом в положительное приращение, должна встречаться с первой волной наполнения в середине длины корпуса судна.

В данном случае противоположно направленные волны компенсируют друг друга, изменяя уклон свободной поверхности воды в камере, что создает условия для отсутствия первого пика обратной гидродинамической силы. Эти условия ограничивают диапазон возможных величин положительного приращения расхода и временных промежутков, характерных как для положительных, так и для отрицательных приращений расхода. Как следствие, ограничиваются диапазоны возможных значений коэффициента приращения расхода.

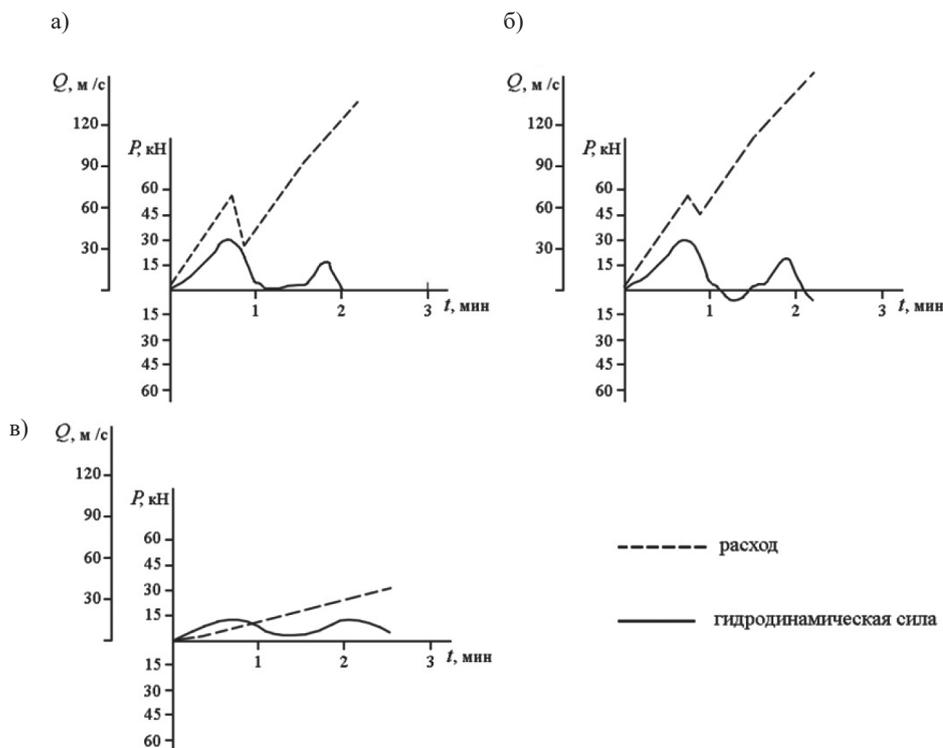


Рис. 3. Зависимости изменения гидродинамической силы от величины приращения расхода: а — при  $k_p < 1$ ; б — при  $k_p \geq 1$ ; в — при замедленном приращении расхода (без убывания расхода)

Зависимости приращения расхода  $Q$ , поступающего в камеру шлюза на начальном этапе ее наполнения, и гидродинамической силы  $P$  от времени (см. рис. 3) рассчитаны для судна водоизмещением  $W = 60\,000$  кН. Анализ величин этих зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении площади отверстия наполнения первый пик прямой силы будет меньше, чем в обычном эксплуатационном случае (см. рис. 1). Это вызвано формированием встречной компенсационной волны (см. условие (2)). Дальнейшее увеличение площади отверстия и, соответственно, расхода поступающей жидкости не приводит к возникновению пиков гидродинамической силы, превышающих по величине первый пик.

Из графика рис. 3, а видно, что величина интенсивности положительного приращения расхода меньше, чем отрицательного ( $k_p < 1$ ). Это обстоятельство с учетом временных параметров распространения волн в камере шлюза создает условия и возможность для формирования в камере компенсационной волны, сопоставимой по параметрам с первой волной попуска. Компенсационная волна встречается с первой волной попуска на участке камеры, соответствующем середине длины судна. После этого наступает промежуток времени, для которого характерным является постоянное значение гидродинамической силы (наличие на графике рис. 3, а плато перед началом второго пика гидродинамической силы). Далее следует увеличение гидродинамической силы при постоянном росте приращения расхода и формирование второго пика гидродинамической силы.

Анализ графика рис. 3, б показывает, что при недостаточной суммарной величине изменения отрицательного приращения расхода ( $k_p \geq 1$ ) не возникают условия для создания компенсационной волны, которая по параметрам соответствовала бы волне первого попуска. Формирующаяся в этом случае компенсационная волна лишь частично уменьшает первую волну попуска, что приводит к наличию участка графика с обратной гидродинамической силой. Величина этой силы имеет меньшее значение по сравнению с наполнением камеры только при положительном приращении расхода (см. рис. 1), характерном для эксплуатационного случая, используемого на действующих шлюзах. Из анализа графика на рис. 3, в видно, что при замедленной величине приращения расхода (в несколько раз меньше, чем на рис. 3, а, б) обратные гидродинамические силы не возникают. Однако при этом продолжительность наполнения камеры становится слишком большой (такие режимы при шлюзовании практически не применяются).

На рис. 4 приведены результаты расчетов величины гидродинамической  $P$  силы в зависимости от коэффициента приращения расхода  $k_p$  для судов различного водоизмещения. На графике можно выделить две характерных области: положительных и отрицательных значений гидродинамической силы. Каждой области в зависимости от водоизмещения судна соответствуют определенные значения коэффициента приращения расхода. Точка перехода каждой кривой через горизонтальную ось графика из области положительных в область отрицательных значений силы определяет максимальное значение первого обратного пика гидродинамической силы, направленной в сторону верхней головы камеры шлюза. По мере увеличения значения коэффициента приращения расхода величина пикового значения обратной гидродинамической силы увеличивается. Однако, как видно из графиков, эта зависимость имеет убывающий характер и ее значение также зависит от расчетного водоизмещения судна.

При уменьшении значений коэффициента приращения расхода наблюдается переход гидродинамической силы через нулевые значения в область положительных значений силы, т. е. обратная гидродинамическая сила исчезает и происходит дальнейшее резкое увеличение положительных значений силы. Значения коэффициента приращения расхода, при которых наблюдаются положительные значения гидродинамической силы, возрастают при увеличении расчетного водоизмещения судна. Отсутствие результатов расчета коэффициента приращения расхода в области его малых значений (на участке, близком к нулю), связанное с ограничениями фактического изменения приращения расхода, вызвано особенностями конструктивных элементов системы наполнения и технологическими ограничениями работы оборудования шлюза.

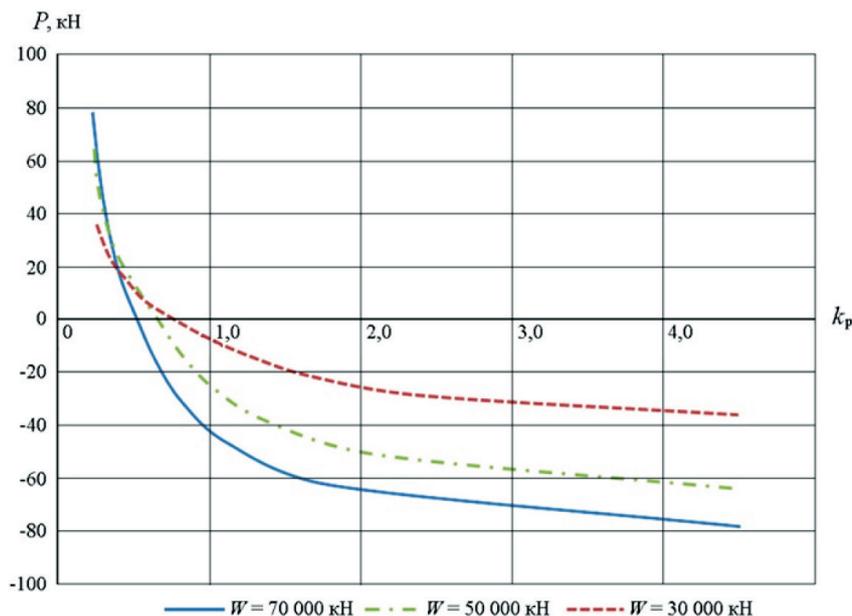


Рис. 4. Зависимость гидродинамической силы от коэффициента приращения расхода при различных значениях водоизмещения судна

Графики, приведенные на рис. 4, позволяют выполнить аналитическую оценку изменения максимальной величины первого обратного пика гидродинамической силы в зависимости от коэффициента приращения расхода, который показывает отношение положительного приращения расхода к отрицательному приращению расхода.

### Обсуждение (Discussion)

Предлагаемый коэффициент приращения расхода  $k_p$  применим для анализа гидродинамического воздействия на шлюзующееся судно на начальном этапе наполнения камеры шлюза, когда при увеличении площади сечения отверстия наполнения расход стабильно увеличивается (см. рис. 2), т. е. имеет место положительное приращение расхода.

В зависимости от действующего напора и габаритов камеры продолжительность этого этапа может составлять 12–25 % от общего времени наполнения камеры шлюза. Эти оценки оставляют актуальным развитие дальнейших исследований по изучению компенсации обратных пиков гидродинамической силы на протяжении всего времени шлюзования.

Дальнейший интерес представляет проверка выполненных теоретических исследований на лабораторных или математических моделях для уточнения и сверки результатов теории и практики, а также верификации полученных результатов.

### Заключение (Conclusion)

В результате проведенных теоретических исследований показана возможность компенсации первого обратного пика гидродинамической силы путем кратковременного изменения приращения расхода на отрицательный и последующего перехода в положительное приращение. Такой режим изменения приращения расхода синхронизирован со скоростями распространения волн в камере шлюза. Полученные результаты позволяют также корректировать в сторону уменьшения первый пик прямой гидродинамической силы.

Новый подход к постановке задачи позволяет направить исследования на улучшение условий стоянки судна при шлюзовании судов в режиме ограничений на использование штатных швартовых устройств шлюза. Такой подход может быть также использован как для действующего флота, так и для перспективного безэкипажного.

Продолжением исследований, выполненных в данной статье, является дальнейшее изучение возможностей компенсации обратных пиков гидродинамической силы на протяжении всего времени шлюзования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гапеев А. М. Системы питания судоходных шлюзов водой / А. М. Гапеев, В. В. Кононов // СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 268 с.
2. Гапеев А. М. Гидравлические расчеты судоходных шлюзов / А. М. Гапеев, В. В. Кононов, К. П. Моргунов. — СПб.: Издательство «Лань», 2020. — 232 с. — EDN PYDRPK.
3. Головкин С. А. Распределение воды в судоходных шлюзах / С. А. Головкин, П. А. Гарибин, А. М. Гапеев. — СПб.: СПГУВК, 2009. — 153 с. — EDN QNWHID.
4. Кузнецов С. С. Обзор технических решений автошвартовых устройств на судоходных шлюзах / С. С. Кузнецов, Н. М. Ксенофонтов, А. А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2024. — № 4. — С. 223–225. — EDN EJLGAJ.
5. Гарибин П. А. Реновация систем наполнения водой камер судоходных шлюзов № 1-6 Водно-Балтийского водного пути / П. А. Гарибин, А. В. Богатов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 640–653. DOI: 10.21821/2309–5180–2020–12–4–640–653. — EDN LRPJZD.
6. Wu L. An Intelligent Monitoring System for the Force Characteristics of Floating Bollards in a Ship Lock / L. Wu, J. Yang, Z. Xiang, M. Liu, M. Li, Y. Di, H. Jiang, C. Dai, X. Ji // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 10. DOI: 10.3390/jmse11101948.
7. Hao Q. Responses of Large-ship Mooring Forces Based on Actual Measurement / Hao Q., Zhang J., Zhu X., Liu J. // J. Ship Mech. — 2021. — Vol.25. — Pp. 1685–1698. DOI:10.3969/j.issn.1007–7294.2021.12.009.
8. Liu M. Safety monitoring method for mooring lines of floating bollards in ship lock. / Liu M., Wang Z., Wu L., Li M., Yang J. // PortWaterw. Eng. — 2023. — Vol.3. — Pp. 85–91. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002–4972.20230306.032.
9. Богатырев В. Г. Перспективы эксплуатации судоходного шлюза: как швартовать безэкипажные суда при шлюзовании / В. Г. Богатырев // Гидравлика и гидромеханика гидротехнических сооружений: сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Георгия Ивановича Мелконяна. Санкт-Петербург, 20 октября 2023 года. — СПб.: Изд-во Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова, 2023. — С. 116–123. — EDN CZSLCC.
10. Моргунов К. П. Обеспечение работы судопропускных сооружений при организации круглогодичной навигации на участке внутренних водных путей в направлении Каспий — Азов / К. П. Моргунов // Гидротехника. — 2022. — № 2(67). — С. 7–13. DOI: 10.55326/22278400\_2022\_2\_7. — EDN XBYUHP.
11. Богатырев В. Г. Особенности реализации бесшвартового шлюзования при эксплуатации судоходного шлюза в условиях отрицательных температур / В. Г. Богатырев // Инновационные технологии и конструкции в гидротехническом, энергетическом и воднотранспортном строительстве: материалы 2-й Международной заочной научно-практической конференции в рамках Международного молодежного форума «Креатив и инновации 2023». Минск, 30 ноября 2023 года. — Минск: БНТУ, 2023. — С. 11–15.
12. Михайлов А. В. О неустановившемся движении воды в камере шлюзов / А. В. Михайлов // Сб. АН СССР. Гидравлика сооружений и динамика речных русел, 1959. — С. 42–68.
13. Володин А. Г. Расчет наполнения камеры шлюза методом Галеркина / А. Г. Володин // Тр. НИИВТ. Вопросы технической эксплуатации транспортных гидротехнических сооружений. — 1986. — С. 68–71.
14. Белкин В. Г. Применение метода Галеркина для потока в камере шлюза / В. Г. Белкин // Тр. НИИВТ. Вопросы гидравлического обоснования путевых работ на реках, 1989. — С. 87–94.

### REFERENCES

1. Gapeev A. M. and V. V. Kononov. *Sistemy pitaniya sudohodnyh shlyuzov vodoy*. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2013: 268.
2. Gapeev, A. M., V. V. Kononov and K. P. Morgunov. *Gidravlicheskie raschety sudokhodnykh shlyuzov* Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo "Lan", 2020: 232.

3. Golovkov, S. A., P. A. Garibin and A. M. Gapeev. *Raspredelenie vody v sudokhodnykh shlyuzakh Sankt-Peterburg*: SPGUVK, 2009: 153.
4. Kuznetsov, S. S., N. M. Ksenofontov and A. A. Butsanets. “Overview of technical solutions for mooring devices on shipping locks.” *Transport Business of Russia* 4 (2024): 223–225.
5. Garibin, P. A. and A. V. Bogatov. “Renovation of water filling systems for the chambers of shipping locks № 1–6 of the volga-baltic waterway.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 640–653. DOI: 10.21821/2309–5180–2020–12–4–640–653.
6. Wu, L., X. Ji, et al. “An Intelligent Monitoring System for the Force Characteristics of Floating Bollards in a Ship Lock.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.10 (2023). DOI: 10.3390/jmse11101948.
7. Hao Q., Zhang J., Zhu X. and Liu J. “Responses of Large-ship Mooring Forces Based on Actual Measurement.” *J. Ship Mech* 25. (2021): 1685–1698. DOI:10.3969/j.issn.1007–7294.2021.12.009.
8. Liu M., Wang Z., Wu L., Li M., Yang J. “Safety monitoring method for mooring lines of floating bollards in ship lock.” *PortWaterw. Eng* 3. (2023): 85–91. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002–4972.20230306.032.
9. Bogatyrev, V. G. “Prospects for operating a shipping lock: how to moor unmanned vessels during locking.” *Gidravlika i gidromekhanika gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyaschennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya Melkonyana Georgiya Ivanovicha, Sankt-Peterburg, 20 oktyabrya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023: 116–123.
10. Morgunov, K. P. “Ensuring the operation of navigation facilities in the organization of year-round navigation on the section of inland waterways in the direction of the caspian sea — azov.” *Gidrotekhnika* 2(67) (2022): 7–13. DOI: 10.55326/22278400\_2022\_2\_7.
11. Bogatyrev V. G. “Osobennosti realizatsii besshvartovnogo shlyuzovaniya pri ekspluatatsii sudokhodnogo shlyuza v usloviyakh otricatel’nykh temperature.” *Innovatsionnye tekhnologii i konstrukcii v gidrotekhnicheskoy, energeticheskoy i vodnotransportnom stroitel’stve: Materialy 2-j Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, v ramkah Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma «Kreativ i innovatsii 2023», Minsk, 30 noyabrya 2023 goda*. Minsk: BNTU, 2023: 11–15.
12. Mihajlov A. V. “O neustanovivshemsya dvizhenii vody v kamere shlyuzov” *Sb. AN SSSR. Gidravlika sooruzhenij i dinamika rechnykh rusel*. (1959): 42–68.
13. Volodin A. G. “Raschet napolneniya kamery shlyuza metodom Galerkina” *Tr. NIIVT. Voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii transportnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij*. (1986): 68–71.
14. Belkin V. G. “Primenenie metoda Galerkina dlya potoka v kamere shlyuza” *Tr. NIIVT. Voprosy gidravlicheskogo obosnovaniya putevykh rabot na rekah*. (1989): 87–94.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Моргунов Константин Петрович** —

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

**Богатырев Владислав Григорьевич** —

кандидат технических наук  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация,  
 г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [Bogatyrevvg@gumrf.ru](mailto:Bogatyrevvg@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Morgunov, Konstantin P.** —

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

**Bogatyrev Vladislav G.** —

PhD of Technical Sciences  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [Bogatyrevvg@gumrf.ru](mailto:Bogatyrevvg@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 04 марта 2025 г.  
 Received: Mar. 4, 2025.

## UNIVERSAL SIMULATION MODEL OF CRUISE AND FERRY SHIPS FLOW TO A SEA PASSENGER PORT

**M. R. Yazvenko**

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

*This research focuses on developing a simulation model to determine an optimal method for distributing the incoming flow of cruise and ferry vessels within a passenger seaport or terminal system. The study presents a new software tool that, based on flexible interface configuration, can be applied to various maritime passenger terminals with multi-scenario modeling capabilities, aimed at refining the technological design methods of maritime passenger ports and terminals. It is noted that deterministic models used to calculate berth capacity or the required number of berths do not fully account for the dynamic parameters of the external environment, which limits their applicability and necessitates the use of simulation methods. The research highlights that, alongside the main parameters of expected annual passenger traffic and the number of cruise ships, the structure of the vessel flow is a key issue. The article proposes a model for prioritizing service to incoming cruise ships and ferry boats and considers the possibility of analyzing random flows of ships entering ports with both low and high priority applications in queues. Based on the implementation of multi-scenario simulation in a developed digital twin using new software, it has been possible to generate a large dataset for subsequent decision-making under uncertainty regarding the strategic development of maritime passenger ports in the sea region and methods for attracting new cruise lines.*

*Key words: transport processes, priority queue, queuing system, multi-priority queue, mathematical modeling, sea passenger port, decision-making.*

**For citation:**

Yazvenko, Maksim R. "Universal simulation model of cruise and ferry ships flow to a sea passenger port." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364.

**УДК 656.021.2, 65.012.1, 656.072**

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ЗАХОДОВ КРУИЗНЫХ И ПАРОМНЫХ СУДОВ В МОРСКОЙ ПАССАЖИРСКИЙ ПОРТ

**М. Р. Язвенко**

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

*Темой исследования является вопрос разработки имитационной модели для определения рационального варианта распределения входящего потока круизных и паромных судов в системе причалов морского пассажирского порта или терминала. Разработка в данном исследовании нового программного инструментария, который на основе гибкости настройки интерфейса может быть применим к различным морским пассажирским терминалам с учетом возможности выполнения многосценарного моделирования, направлена на уточнение методов технологического проектирования морских пассажирских портов и терминалов. Отмечается, что используемые детерминированные модели для расчета пропускной способности причала или необходимого количества причалов не позволяют учитывать в полной мере динамические параметры влияния внешней среды, что ограничивает их применение и формирует необходимость использования методов имитационного моделирования. В исследовании отмечается, что наряду с основным параметром: ожидаемым годовым пассажиропотоком и количеством круизных и паромных судов, ключевым вопросом является структура потока судов. Предложена модель приоритизации обслуживания входящих круизных и паромных судов, рассматривается возможность исследования наличия случайного потока судов, заходящих в порты, имеющих как низкий, так и высокий приоритет заявок в очереди. На основе выполнения многосценарного моделирования в разработанном цифровом двойнике с использованием новой программы доказана возможность сформировать набор больших данных для последующего приня-*

тия решений при неопределенности стратегического развития морского пассажирского порта в регионе моря и методам привлечения новых круизных линий.

*Ключевые слова:* транспортные процессы, приоритетная очередь, система массового обслуживания, разноприоритетная очередь, математическое моделирование, морской пассажирский порт, принятие решений.

**Для цитирования:**

Язвенко М. Р. Универсальная имитационная модель потока поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт / М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364. — EDN FKUCBB.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время для расчета пропускной способности одного причала и необходимого числа причалов при заданном грузообороте или требований пассажиропотока используются детерминированные модели, которые обладают достаточной простотой и наглядностью. Однако детерминированные модели не в полной мере отражают специфику процесса обработки круизных или паромных судов [1], [2]. В действительности, моменты прихода судов в морские пассажирские порты представляют собой нерегулярные потоки событий, в результате чего возникает область влияния случайных процессов. В сформированное расписание на период навигации вносятся правки и корректировки на основе влияния факторов внешней среды. Это объясняется следующими причинами:

1. Для круизных или паромных линий существует график прихода судов, который обусловлен интересами круизной компании, а также заинтересованностью со стороны пассажиров в посещении выбранного порта на маршруте. Как следствие, величины интервалов между приходами судов могут отличаться.

2. Время прихода круизного судна в морской пассажирский порт во многих случаях может отклоняться от расчетного по разным причинам, которые не предусматриваются графиком. К ним можно отнести метеорологические условия, задержку в порту, к примеру, из-за пассажира или инцидента, необходимость корректировки маршрута и ряд других причин, имеющих стохастический характер.

3. В связи с внешними факторами возможны варианты наложения графиков круизных компаний.

4. Для отдельных круизных и паромных линий величины интервалов между приходами судов могут отличаться друг от друга.

5. Ввиду тенденции к увеличению размеров круизных и паромных судов, исследованной в статьях [3]–[5], постепенное их увеличение в очереди судов формирует необходимость решения задач перезакрепления, выделения приоритетности причалов за новыми круизными судами. Кроме того, имеет место формирование задачи перед руководителем региона и порта либо необходимости выделения нового отдельного морского пассажирского терминала под крупные суда, либо модернизации выделенных причалов с сохранением старых. В связи с этим возможны ситуации, когда в одних случаях образуются очереди из судов, в других — может наблюдаться простаивание причалов. Таким образом, кроме детерминированных моделей необходимо использовать вероятностные модели, полученные на основе теории массового обслуживания, имитационного моделирования, а также формировать условия и гипотезы для многосценарного моделирования в целях формирования полной группы возможных вариантов входных потоков круизных и паромных судов.

В работах [6]–[8] на основе выполненного ретроспективного анализа детально выделены отдельные стадии развития Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» (далее — Пассажирский порт «Морской фасад») и представлено решение задачи модернизации причалов для возможности принимать большие круизные суда. Для увеличения длины круизных судов необходимо было увеличить причалы для швартовки судов длиной 333 м<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». Инвестиционные проекты [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.portspb.ru/O\\_porte/about/invest\\_programm](https://www.portspb.ru/O_porte/about/invest_programm) (дата обращения 20.01.2022).

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим ситуацию модернизации причалов Пассажи́рского порта «Морской фасад». Реализация инфраструктурного проекта предусматривала реконструкцию причала № 7 путем возведения трех выносных швартовных палов с соединительными мостиками и увеличение длины причалов № 6 и 7 (причального фронта) на 108,6 м. Данное изменение с учетом выполненного ретроспективного анализа представлено на рис. 1.

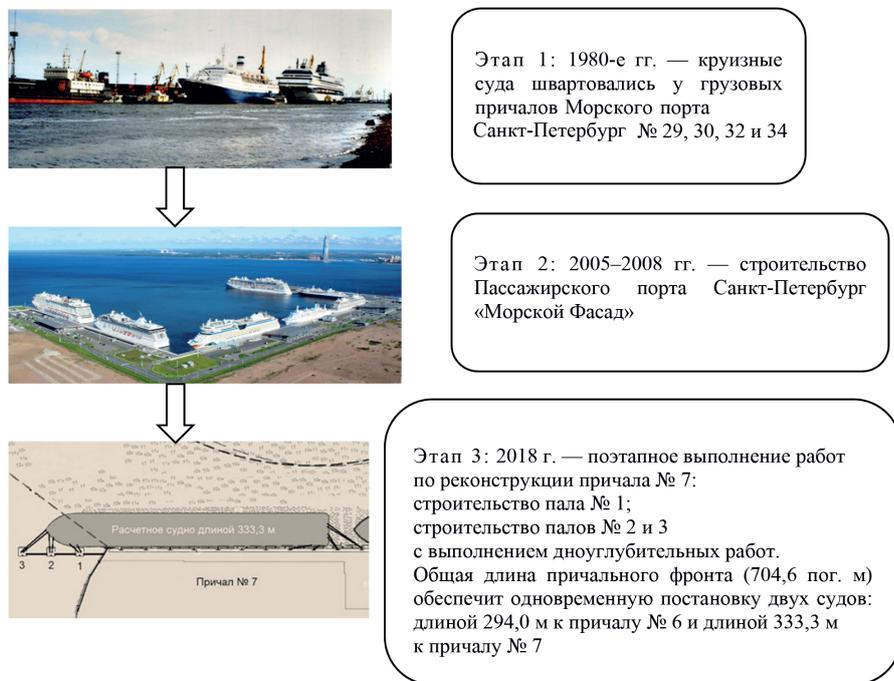


Рис. 1. Этапы развития Пассажи́рского порта «Морской фасад» с выделением необходимости модернизации причалов под влиянием тенденции к увеличению размеров круизных судов

К другим особенностям, которые необходимо принимать во внимание, относят то, что постоянные величины, установленные в нормативах проектирования портов, не позволяют учитывать особенности конкретного направления или города размещения пассажирского порта либо терминала. Например, в «Нормах технологического проектирования морских портов» продолжительность стоянки судов равна 1 ч для конечных портов и 0,5 — для промежуточных. Однако в г. Санкт-Петербурге установлено безвизовое пребывание иностранцев в туристических целях до 72 ч, что сказывается на среднем времени стоянки судов<sup>2</sup>, указанном в работах [9], [10]. Подобные особенности невозможно отобразить существующими в нормативном документе константами. Подобного рода неточности в расчетах могут сказываться на качестве оказываемых услуг и повышении финансово-экономических рисков для порта в будущем.

Современная ситуация в сфере морских пассажирских перевозок, в отношении восстановления и развития новых маршрутных сетей характеризуется большим влиянием внешних факторов, которые ставят перед руководителями портов и терминалов задачу принятия решений при неопределенности [11]. Для реализации данной задачи необходимо наличие больших данных, которые можно получить только на основе множественного анализа различных сценариев развития, набора вариантов интенсивностей судозаходов и включения вероятностных моделей в процесс анализа.

В данной работе выполнено сравнение аналитического подхода для определения пропускной способности морского пассажирского порта с новой имитационной моделью порта на примере Пассажи́рского порта «Морской фасад».

<sup>2</sup> Пассажи́рский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». Инвестиционные проекты [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.portspb.ru/O\\_porte/about/invest\\_programm](https://www.portspb.ru/O_porte/about/invest_programm) (дата обращения 20.01.2022).

Целью исследования является разработка новой имитационной модели порта и программы ЭВМ (модели мезоскопического уровня транспортного планирования, так как рассматривается система причалов), а также некоторого унифицированного программного инструмента для генерации потока судов по заданному вероятностному закону, способного анализировать работу порта при одновременном приеме судов как на основе расписания судозаходов навигации, так и при учете возможного сценария случайного незапланированного потока судов для сведения к минимуму возможных нарушений при обслуживании заранее согласованных судов в расписании.

Потоки круизных и паромных судов, а также транспортные и пассажирские потоки являются ключевым элементом для исследования работы морского пассажирского порта. Наличие данных элементов является необходимым условием его непрерывной деятельности. Исследование потоков и разработка их математических моделей могут существенно повысить эффективность управления пассажирским портом и его ресурсами как на стратегическом, так и на оперативном уровне. Согласно открытым аналитическим данным агентства Cruisemarketwatch<sup>3</sup>, по всем регионам морей сохраняется тенденция как к увеличению пассажиропотока и развитию маршрутных сетей круизных линий, так и к увеличению количества крупных круизных и паромных судов (рис. 2).

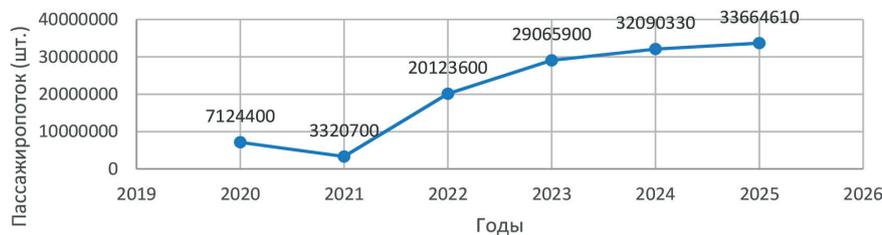


Рис. 2. Аналитические данные по восстановлению отрасли и пассажиропотоков морских паромных и круизных линий в 2020–2025 гг.

Одними из новых круизных судов, которые вышли на маршруты в 2025 г., являются:

- круизный лайнер Mein Schiff Relax компании TUI Cruises вместимостью 4 000 пассажиров;
- круизный лайнер World America компании MSC Cruises вместимостью 5 400 пассажиров;
- круизный лайнер Star of the Seas компании Royal Caribbean вместимостью 5 610 пассажиров.

Представленные данные подтверждают сохраняющуюся тенденцию к строительству крупных круизных лайнеров, что формирует новые требования для портов и терминалов. Для Пассажирского порта «Морской фасад» интенсивность работы до 2019 г. представлена на рис. 3<sup>4,5</sup>.

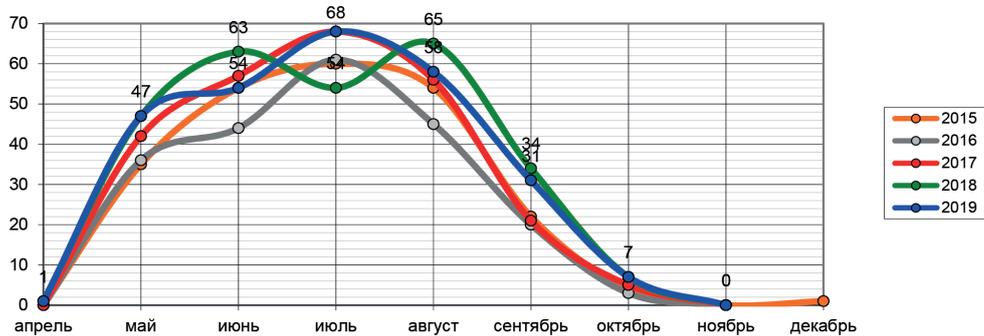


Рис. 3. Судозаходы по месяцам за 2015–2019 гг. для морского пассажирского порта «Морской фасад» (г. Санкт-Петербург)

<sup>3</sup> Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 01.03.2025).

<sup>4</sup> Статистика — Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.portspb.ru/O\\_porte/about/stat\\_new](https://www.portspb.ru/O_porte/about/stat_new) (Дата обращения: 01.03.2025).

<sup>5</sup> Расписание — Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.portspb.ru/Raspisanie> (Дата обращения: 01.03.2025).

На рис. 4 показан график использования причалов № 1–7 Пассажирского порта «Морской фасад», на рис. 5 приведен результат анализа длины круизных и паромных судов для этого пассажирского порта.

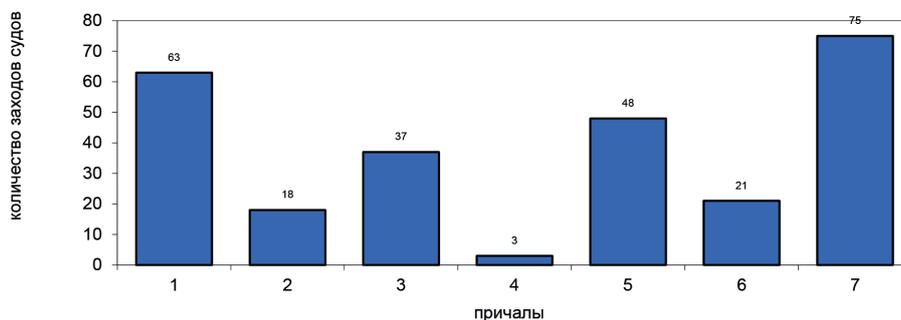


Рис. 4. Распределение прибытий круизных и паромных судов в Пассажирском порту «Морской фасад» (г. Санкт-Петербург)

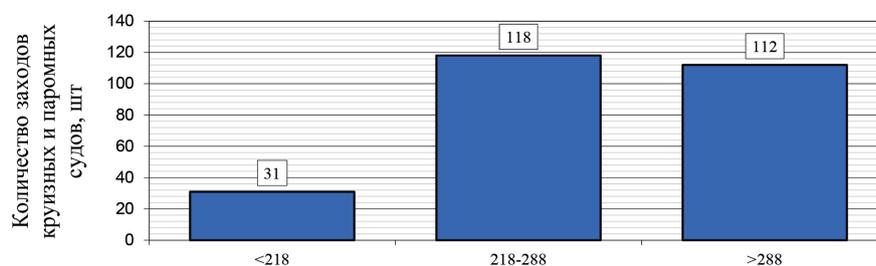


Рис. 5. Анализ длины круизных и паромных судов для Пассажирского «Морской фасад» за 2019 г. (г. Санкт-Петербург)

Современные методы проектирования морских пассажирских портов, расчеты основных параметров, потребности в причалах, оборудовании, а также требования к зданиям и сооружениям регламентированы действующими сводами правил<sup>6,7</sup>, которые содержат теоретические расчетные величины для использования в процессе<sup>8</sup> принятия проектных или операционных решений в работе порта. Состав флота судов оказывает большое влияние на технологические расчеты при проектировании порта. В сфере пассажирских перевозок суда могут значительно отличаться друг от друга по различным характеристикам, таким как длина, пассажироместимость, наличие отсеков для накатной техники (Ro-Ro) и т. д., которые необходимо учитывать при проектировании.

Рассмотрим следующий модельный сценарий класса систем массового обслуживания (СМО). Случайный характер прибытий судов в порт и случайность времени обслуживания судов, зашедших в порт вне расписания, вызывает разброс реальных результатов с математическим ожиданием. Различные отклонения от ожидаемых значений входного порта вызывают возможные потери морского порта в виде простоев, накопление очередей на обслуживание и связанных с этим экономических издержек. Проблема расчетов базовых параметров по нормативным документам рассматривается при использовании усредненных детерминированных величин, что не может в достаточной степени описать и учитывать стохастические процессы. При выполнении расчета определяется обобщенная величина, а именно суточная производительность при непрерывной работе на усредненное судно. Полученное значение используется для расчета требуемого числа при-

<sup>6</sup> Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И. И. Грушко. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

<sup>7</sup> Джейсуол Н. К. Очереди с приоритетами / Пер. с англ. И. С. Нефедовой, В. С. Манусевича. М.: Мир, 1973. — 280 с.

<sup>8</sup> СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов» / Утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 1 марта 2018 г. № 75: дата введ. 2018–09–01, разработан ОАО «Созмортранспроект» и ЗАО «ЦНИИМФ». М.: Стандартинформ, 2018. IV, 217 с. Текст: непосредственный.

чалов. Таким образом, случайный характер используемых величин обуславливает возможные отклонения реальных результирующих значений от среднего, даже если последнее по набору уравнений рассчитано верно. Рассмотрим модель приоритизации обслуживания заходящих паромных и круизных судов (рис. 6).

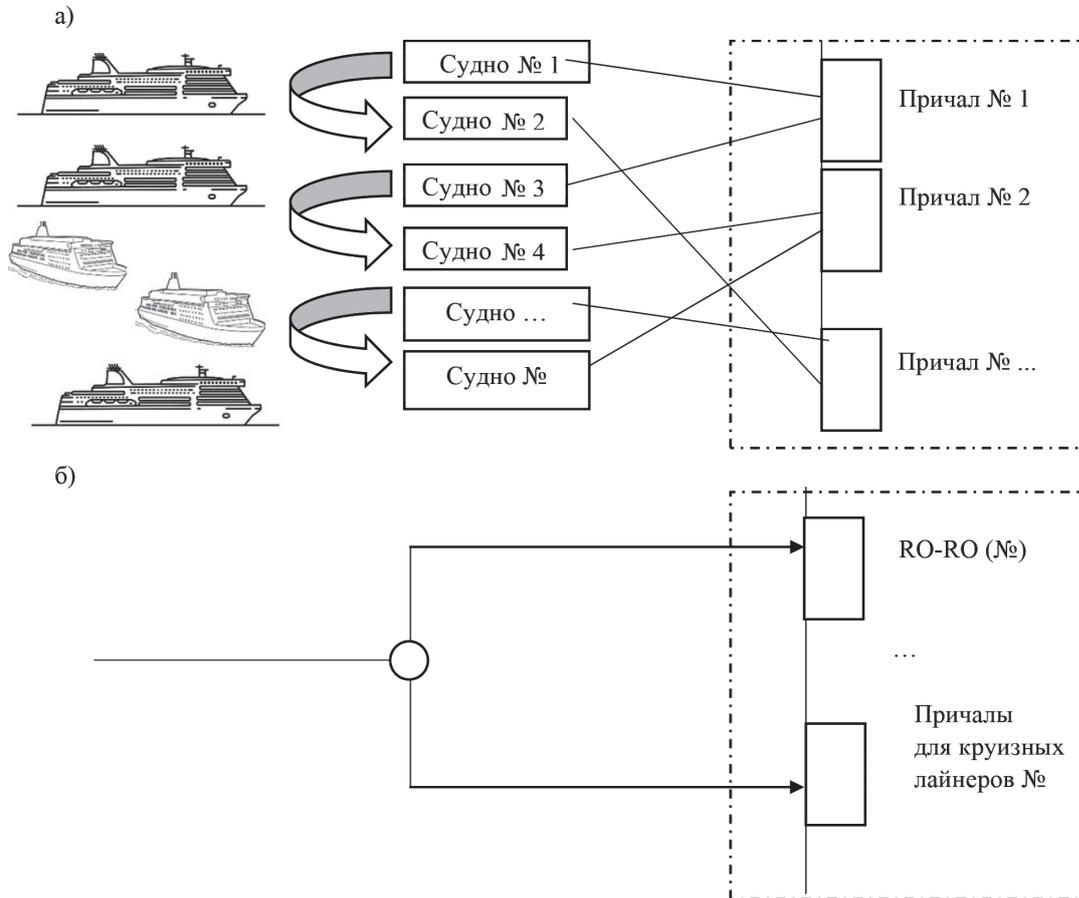


Рис. 6. Модель приоритизации обслуживания входящих паромных и круизных судов в морской пассажирский порт:

а — общая модель входного потока судов; б — модель приоритизации с выделением причалов

К параметрическим факторам относится в первую очередь приоритизация договорных отношений между участниками портовой деятельности, а также стохастические вмешательства внешней среды. Кроме того, на рис. 6 представлена модель, когда поток судов разделяется с учетом специализации причалов. Для решения данной задачи в Пассажирском порту «Морской фасад» с целью установления круглогодичного паромного сообщения с возможностью использования инфраструктуры морского терминала и пункта пропуска для осуществления операций, связанных с приемом грузовых автотранспортных средств, перемещаемых паромами, была выполнена реконструкция пункта пропуска для приема паромных и круизных судов.

В данном исследовании будет производиться моделирование потока судов, заходящих в морской пассажирский порт. В качестве модели будут использоваться параметры инфраструктуры и сведения о реальном входном потоке Пассажирского порта «Морской фасад». В данный порт суда могут заходить как по расписанию, так и случайным образом. Расписание составляется перед началом навигации на весь ее период. Судовладельцы гарантируют, что их судно прибудет в порт в назначенный срок, а пассажирский порт, в свою очередь, гарантирует возможность принять данное судно без задержек. При этом сохраняется возможность для других судовладельцев прибывать вне расписания, заранее подав запрос на швартовку. Такие суда могут быть приняты только в том случае, если это не мешает прибытию и обслуживанию судов, курсирующих по расписанию.

Суда, прибывающие в порт вне расписания, ограничены случайным временем между заходами. Согласно теории массового обслуживания, случайный поток заявок можно описать с помощью распределения Пуассона.

Пусть  $\lambda$  — среднее число заявок простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени. Пуассоновское распределение имеет следующую формулу:

$$F(t) = e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\lfloor t \rfloor} \frac{\lambda^i}{i!}, \quad t \geq 0. \quad (1)$$

Тогда вероятность появления  $k$  заявок простейшего потока за время  $t$  определяется по формуле Пуассона:

$$P_k(t) = \frac{\lambda^t e^{-\lambda}}{t!}, \quad t \in \{0, 1, \dots\}. \quad (2)$$

Рекомендации, указанные в «Нормах технологического проектирования морских портов» в части расчета пропускной способности морских пассажирских портов, принимающих круизные международные рейсы, ограничиваются следующим нормативом пропускной способности (табл. 1).

Таблица 1

**Расчет пропускной способности причала**

Вид круизного рейса	Норматив месячной пропускной способности одного причала при круизно-экскурсионной форме организации пассажирских перевозок, судозаход	
	Конечный пункт захода, город, имеющий туристическое значение	Прочие пункты
С российскими туристами	15	30
С иностранными туристами	12	20

Санкт-Петербург — город, имеющий туристическое значение, что подтверждает введенный 72-часовой безвизовый режим для иностранных туристов. Соответственно можно принять, что для морского порта, принимающего иностранные круизы в г. Санкт-Петербурге, норматив на каждый причал составляет 12 судозаходов в месяц. При таком нормативе время от одного судозахода до другого должно быть не более 60 ч (2,5 сут).

Проанализировать показатели работы порта на основе реальных данных и спрогнозировать работу при теоретическом максимуме можно с помощью математического и имитационного моделирования. Морской пассажирский порт можно представить для использования аппарата имитационного моделирования как СМО. В работах [1], [4], [6], [8], [10], [12] описаны примеры применения математического аппарата для моделирования работы порта и ответа на вопрос по прогнозированию его развития. Порт представляет собой многоканальную СМО. В состоянии системы  $S_0$  все каналы обслуживания свободны. В состояниях  $S_k$ , где  $k$  от 1 до  $n$ , обслуживанием заявок заняты  $k$  каналов, но не все  $n$  каналов. Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно под воздействием входящего потока заявок, интенсивность которого равна  $\lambda$ . Отказ в обслуживании будет наступать в случае занятости всех каналов. Состояние системы обслуживания при неравномерном потоке описывается формулой Эрланга:

$$P_k = \frac{\frac{1}{K!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^K}{1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{1}{2!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n}, \quad (3)$$

где  $P_k$  — вероятности занятости  $k$  каналов обслуживания;  
 $P_0$  — вероятность того, что все каналы будут свободны;  
 $P_n$  — вероятность того, что все каналы заняты.

Отказ наступает, когда заняты все  $n$  мест в системе, т. е. система находится в состоянии  $S_n$ :

$$P_{\text{отк}} = P_n.$$

Среднее количество занятых каналов определяется по следующей формуле:

$$\bar{n} = \sum p_k K. \quad (4)$$

Коэффициент загрузки каналов определяется по формуле

$$K_{\text{загр}} = \frac{\bar{n}}{n}. \quad (5)$$

Недостатком математического решения является то, что значение получается теоретическим, не принимающим во внимание колебания входного потока и скорости обслуживания. В таком случае необходимо использовать имитационное моделирование, многосценарное исследование в цифровом двойнике, выполненном в программной среде AnyLogic. Таким образом, система моделируется на среднем уровне абстракции, при котором не учитываются многие физические детали, например, скорость ветра или температура воздуха [12]. За счет этого данный вид моделирования позволяет имитировать функционирование крупных транспортных систем. Работу порта можно моделировать при помощи дискретно-событийного моделирования, при котором обслуживание судна в порту можно представить в виде последовательности четырех событий: прибытие судна, ожидание свободного причала, обслуживание (которое представляется как задержка во времени) и отправление судна.

В ходе исследования была разработана имитационная модель на примере Пассажирского порта «Морской фасад», позволяющая изучить работу конкретного морского пассажирского порта с одновременным приемом судов как по заранее составленному расписанию навигации, так и возможного случайного потока судов в порту.

Основа модели морского пассажирского порта реализована как СМО и описана в работах [12], [13]. Рассмотрим логику реализации модели. В имитационной модели<sup>9</sup> реализована приоритетность обслуживания. Поток судов, прибывающих по расписанию, обладает абсолютным приоритетом в обслуживании и с причала его имеет любое другое судно, занимающее его в данный момент в модели. Таким образом, моделируется реальное требование принятия судов, не согласовавших заход до начала навигации. Помимо этого реализована приоритетность непосредственно в потоке случайно заходящих судов, которая описана в работах [13]–[15]. Время стоянки судов случайного потока соответствует распределению времени стоянки судов, прибывающих по расписанию, как и распределению судов по их размерам, что оказывает влияние на множество причалов, которые могут принять данные суда. Суды, курсирующие по расписанию, будут прибывать в полном соответствии с расписанием эталонного доступного года навигации 2019 г. для Пассажирского порта «Морской фасад».

Разработанная имитационная модель имеет трехмерную визуализацию для наглядности порядка приема судов, а также графики, отражающие основные показатели эффективности системы морского пассажирского порта (рис. 7). В двухмерном окне у каждого причала и судна визуально указываются их характеристики: для причалов — длина фронта, а для судов — их длина и особые отметки: является ли судно ролкером, принимаемым только на специализированных причалах, или судно принимается по расписанию.

<sup>9</sup> Дискретно-событийное моделирование — инструмент имитационного моделирования AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/discrete-event-simulation/> (Дата обращения: 01.03.2025)

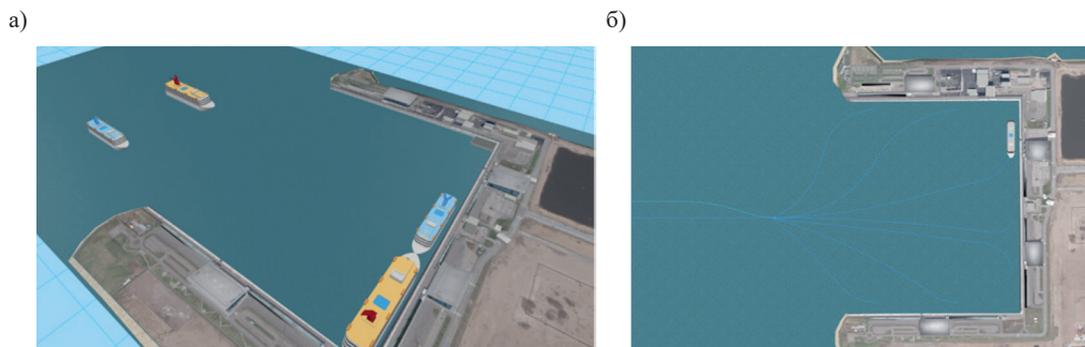


Рис. 7. Визуализация модели потока судов в имитационной модели морского пассажирского порта в Anylogic: а — 3D модель; б — выполнение учета размера круизного и паромного судна и выделение причалов

С помощью разработанной новой имитационной модели морского пассажирского порта и разработанной программы ЭВМ<sup>10</sup> можно проводить как обыкновенные эксперименты (прогоны модель), которые продемонстрируют моделирование одного сезона навигации и определяют ключевые показатели работы порта, очереди и коэффициент загрузки причалов с помощью выполнения многосценарного моделирования, так и оптимизационные эксперименты, с помощью которых можно найти определенное значение интенсивности случайного входного потока для поиска определенной целевой функции при требуемых ограничениях.

### Результаты (Results)

Проведем математическое моделирование пассажирского порта как семиканальной системы массового обслуживания по данным эталонной навигации 2019 г. За весь период навигации в количестве 177 дней порт посетило 265 судов со средним временем стоянки 1,36 сут. Используя норматив месячной пропускной способности по табл. 1, с учетом количества причалов и длительности навигации, можно определить, что порт теоретически может принять 495 судов в течение всей навигации при идеальных условиях. При математическом анализе порта как семиканальной СМО по формулам (3)–(5) получаются следующие вероятности занятости причалов и коэффициент загрузки морского пассажирского порта (табл. 2, рис. 8).

Таблица 2

Вероятности занятости причалов по данным 2019 г.

Вероятность занятости определенного числа причалов										
Интенсивность	Количество причалов								Коэффициент загрузки	
	0	1	2	3	4	5	6	7	$\bar{n}$	K
265	0,13	0,265	0,27	0,185	0,094	0,039	0,013	0,0038	2,04	0,291
495	0,023	0,088	0,167	0,213	0,203	0,155	0,098	0,054	3,61	0,516

На основе результатов табл. 2 видно, что в случае принятия портом случайного потока судов с интенсивностью, приближенной к нормативному значению, наиболее вероятное состояние системы сдвинется на 3–4 занятых причала с 1–2 при реальной интенсивности потока. В данном случае также возрастет до 5,4 % вероятность накопления очереди.

<sup>10</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660487 Российская Федерация. Программа для моделирования загруженности причалов морского пассажирского порта с учетом различных приоритетов круизных или паромных судов / М. Р. Язвенко; заяв. и патентообл. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; заявл. 07.05.2024; опубл. 07.05.2024. EDN DDLUCU.

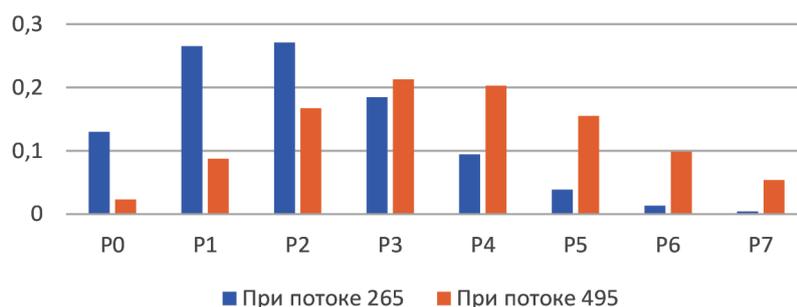


Рис. 8. Вероятности занятости причалов в течение 2019 г.

При моделировании ситуации с пиковой теоретической интенсивностью при случайном входном потоке данные имитационного моделирования приблизительно повторяют полученные математические вероятности до определенного момента, когда начинаются отклонения в сторону увеличения реальной нагрузки, как показано на рис. 9. Данные отклонения вызваны тем, что математический расчет принимает время обслуживания как описываемое нормальным распределением, которому в действительности время стоянки не соответствует.

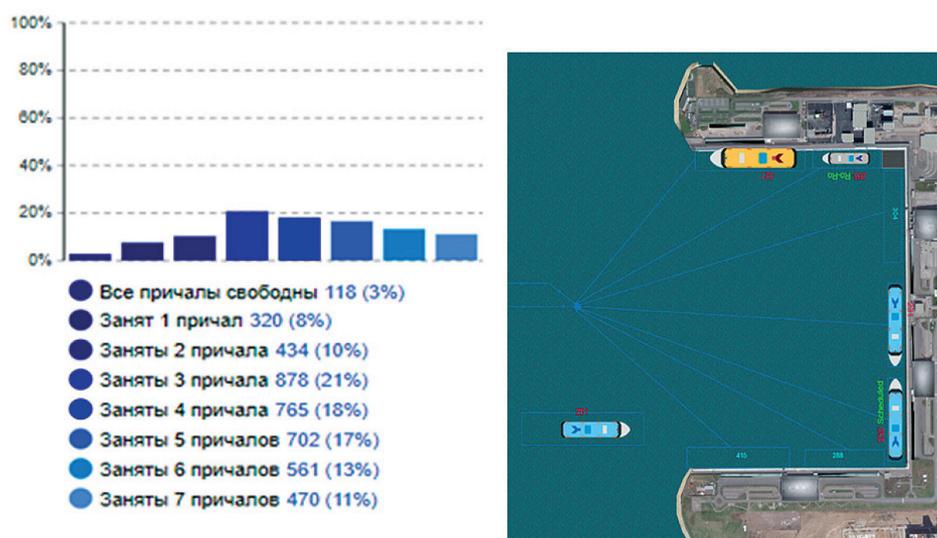


Рис. 9. Состояния системы морского пассажирского порта при моделировании случайного потока входящих паромных и круизных судов

При моделировании случайного потока судов с максимально допустимой по нормативу интенсивностью по результатам нескольких прогонов получены следующие усредненные результаты по основным показателям очереди (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты моделирования случайного потока при максимальной интенсивности**

Интенсивность	Средняя длина очереди	Максимальная длина очереди	Среднее время в очереди, сут	Максимальное время в очереди, сут	Коэффициент загрузки порта
495	0,398	5,7	0,145	2,553	0,562

Видно, что при использовании максимально допустимой нормативом интенсивности входного потока происходит значительное накопление очереди, в некоторые моменты времени достигающее 2,553 сут. Это вызвано дифференциацией судов между собой: не все суда могут быть обслужены на всех причалах из-за ограничений в размерах [12]–[15] и распределения времени

обслуживания. Данные результаты моделирования случайного потока показывают, что использование нормативных значений значительно ограничено.

Рассмотрим моделирование реальных сценариев с известным расписанием и случайным потоком судов, поступающих одновременно. С помощью оптимизационного эксперимента в программной среде AnyLogic получим значение интенсивности случайного потока, при котором будут достигаться определенные показатели работы очереди. В качестве ограничений для данного эксперимента примем значения работы очереди из табл. 4. В качестве целевой функции будет выступать количество успешно обслуженных судов. В среднем через порт по результатам эксперимента проходит 433 судна. Полученное значение на 12,5 % ниже норматива. Средняя интенсивность случайного потока составила 28 судо-сут, или 165 судов за навигацию.

Полученные данные можно использовать для проведения моделирования работы морского пассажирского порта за навигацию с существующим расписанием и приемлемым случайным потоком. Усредненные значения на основе результатов серии выполнения имитационного моделирования представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты моделирования максимальной интенсивности при наличии расписания**

Среднее количество пришедших судов случайного потока	Средняя длина очереди	Максимальная длина очереди	Среднее время в очереди, сут	Максимальное время в очереди, сут	Коэффициент загрузки порта
158,5	0,085	2,385	0,035	2,708	0,469

На рис. 10, а показана «оконная» форма графиков функции при моделировании по расписанию, полученных с помощью имитационной модели в среде AnyLogic.

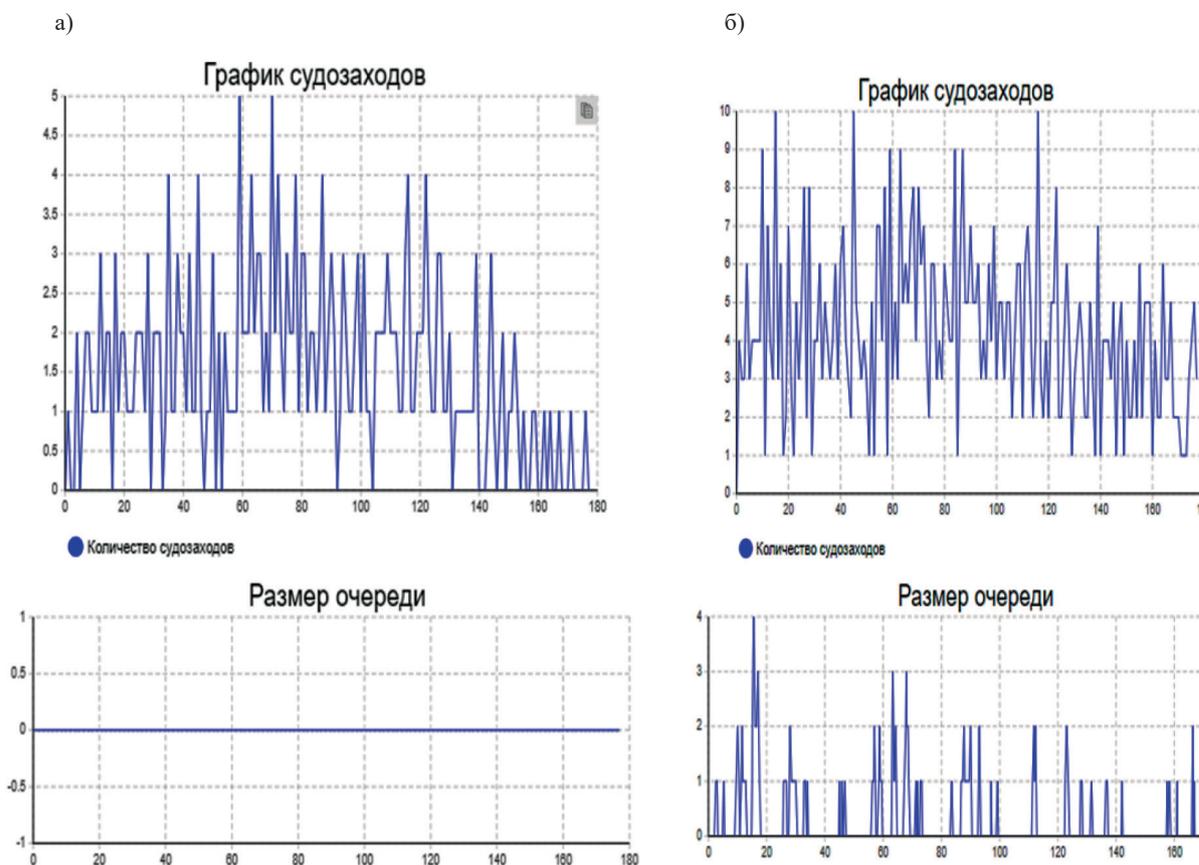


Рис. 10. Оконные формы результатов различных сценариев входного потока круизных и паромных судов: а — график судозаходов при моделировании движения только по расписанию; б — график судозаходов при моделировании движения с расписанием и случайным потоком

При условии добавления к расписанию случайного потока судов будут накапливаться очереди с периодичностью в несколько дней из этих же судов (рис. 10, б). При этом можно заметить, что при приеме максимально возможного случайного потока не наблюдалось ни одного случая, когда бы не прибыло ни одного судна.

### **Обсуждение (Discussion)**

Для исследования морского пассажирского порта применимы модели СМО. В данном случае причалы и поступающие для обработки на них круизные и паромные суда образуют обобщенную СМО. Приход судна на терминал является заявкой, причал — каналом ее обслуживания. Однако необходимо принимать во внимание, что время обработки заявок в реальной системе не подчиняется закону Пуассона.

Сравнение данных имитационного моделирования с результатами аналитических расчетов обладают большей перспективностью для последующей обработки и формирования данных для систем принятия решений при неопределенности с поправкой на то, что аналитические расчеты принимали время обслуживания как распределенное по нормальному закону, показало, что результаты состояний системы в имитационной модели и вероятностей при расчетах оказались достаточно приближены друг к другу. При моделировании максимального случайного потока в некоторых случаях возникали задержки в обработке судов. При попытке достичь таких же показателей работы системы, как при максимальной интенсивности случайного потока, но при применении схемы обслуживания с расписанием и случайными заходами, произошло 15 %-е снижение допустимой интенсивности входного потока.

Близкое совпадение результатов имитационного моделирования случайного потока и аналитического расчета по нормативу и законам теории массового обслуживания показывает адекватность разработанной новой имитационной модели морского пассажирского порта. Полученная модель может использоваться для определения допустимого уровня интенсивности входного потока судов, выполнения многосценарного моделирования с учетом вероятностных процессов и формирования набора данных разброса значений, что позволяет руководителю порта перейти к системе принятия решений при неопределенности.

### **Заключение (Conclusion)**

Активное влияние внешней среды, а также региональных факторов и трендов в сфере строительства новых круизных лайнеров и паромных судов формирует необходимость учета новых переменных, трансформирования принятия решений при неопределенности, что требует перехода от алгебраических моделей к имитационным.

В результате проведенного исследования выполнено следующее.

1. Разработана новая имитационная модель для оценки пропускной способности морского пассажирского порта, принимающего в модельных сценариях суда как по заранее составленному расписанию (известному на навигацию), так и при условии возникновения случайного потока судов, а также новая программа ЭВМ.
2. Представлена разработанная модель приоритизации обслуживания входящего потока паромных и круизных судов в морской пассажирский порт.
3. Представлены результаты исследования различных сценариев входного потока судов.
4. Приведены новые результаты определения состояния системы морского пассажирского порта при моделировании случайного потока входящих паромных и круизных судов.

Использование разработанного инструментария позволяет для лиц, принимающих решение, получить полную группу данных многосценарного моделирования: вероятности занятости определенного числа причалов, коэффициент загрузки причалов, среднюю длину очереди судов, максимальную длину очереди и др. На основе новой созданной имитационной модели появляется возможность исследовать систему морского пассажирского порта с абсолютным приоритетом, с относительным приоритетом, с ограниченным временем пребывания судна

в очереди, с ограничением по длине очереди и ряд других необходимых сценариев. Прогнозирование возможных колебаний судопотока, особенно в условиях влияния стохастических процессов, позволяет снизить неопределенность и заранее подготовиться к принятию соответствующих управленческих решений по модернизации инфраструктуры. Разработанная новая имитационная модель и разработанная программа ЭВМ для морского пассажирского порта позволяют увеличить возможности существующих моделей и методов, не выходя за пределы имеющегося опыта проектирования портов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майоров Н. Н.* Исследование вариантов обоснования модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта для решения задачи прогнозирования его развития с учетом влияния внешней среды / Н. Н. Майоров, А. А. Добровольская // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 701–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-701-712. — EDN ZASXYF.
2. *Ćorluka G.* Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
3. *Krile, S.* The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // Transport Problems. — 2020. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 203–214. — DOI 10.21307/TP-2020-060.
4. *Krile S.* Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. DOI: 10.3390/su13073869.
5. *Майоров Н. Н.* Влияние основных трендов в сфере круизных и паромных перевозок на инфраструктуру морских пассажирских портов и терминалов / Н. Н. Майоров, А. А. Добровольская // Системный анализ и логистика. — 2022. — № 4(34). — С. 144–152. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-144-152. — EDN GCOVWE.
6. *Майоров Н. Н.* Исследование изменений и управление развитием морского пассажирского порта / Н. Н. Майоров // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 1(27). — С. 20–30. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-20-30. — EDN TAFFWT.
7. *Добровольская А. А.* Теория транспортных процессов и систем. Паромные маршруты и морские пассажирские порты / А. А. Добровольская, Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: СПб. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2022. — 99 с. — EDN HRGLFO.
8. *Майоров Н. Н.* Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов: моногр. / Н. Н. Майоров. — СПб.: ГУАП, 2018. — 150 с.
9. *Язвенко М. Р.* Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделирования / М. Р. Язвенко // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 2(28). — С. 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113. — EDN EJHUOQ.
10. *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.
11. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: Academia, 2010. — 336 с.
12. *Майоров Н. Н.* Исследование операционных процессов обслуживания пассажиров в морском пассажирском терминале с использованием моделирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.и О. Макарова. — 2016. — № 6(40). — С. 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80. — EDN XHLRJH.
13. *Майоров Н. Н.* Планирование работы морского пассажирского терминала на основе исследования интенсивностей заходов круизных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128. — EDN LMZQEO.
14. *Добровольская А. А.* Принятие решений при неопределенности по прогнозированию развития морского пассажирского порта на основе моделирования разных приоритетов заявок судов / А. А. Доб-

ровольская, Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сборник статей XXVI Международной научной конференции: в 3 ч. — Санкт-Петербург, 29 мая — 02 2023 года. — Ч. 3. — СПб.: СПб. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2023. — С. 107–112. — EDN PEZXTZ.

15. Майоров Н. Н. Исследование вариантов формирования данных на основе многосценарного моделирования по развитию морского пассажирского терминала для принятия решений при неопределенности / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909. — EDN KNAWDQ.

## REFERENCES

1. Maiorov, N. N. and A. A. Dobrovolskaya. “Research of the sea passenger port infrastructure modernization to solve the problem of forecasting development, taking into account the influence of the external environment.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 701–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-701-712.

2. Čorluka, G., I. Peronja and D. Tubić “Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective.” *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1

3. Krile, S. and N. Maiorov “The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals.” *Transport Problems* 15.1 (2020): 203–214. DOI 10.21307/TP-2020-060.

4. Krile, S., N. Maiorov and V. Fetisov. “Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development.” *Sustainability* 13.7 (2021). DOI: 10.3390/su13073869.

5. Mayorov, N. N. and A. A. Dobrovolskaya. “Influence of main trends in cruise and ferry transportation on the infrastructure of sea passenger ports and terminals.” *System Analysis And Logistics* 4(34) (2022): 144–152. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-144-152.

6. Maiorov, N. N. “Research of change and management of sea passenger port development.” *System Analysis And Logistics* 1(27) (2021): 20–30. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-20-30.

7. Dobrovolskaya, A. A., N. N. Mayorov and V. A. Fetisov. *Teoriya transportnykh protsessov i sistem. Paromnye marshruty i morskije passazhirskie porty* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2022: 99.

8. Maiorov N. N. *Prognozirovanie razvitiya morskikh passazhirskih terminalov*. SPb.: SUAI, 2018.

9. Yazvenko, M. R. “Research of berths utilization at sea passenger port on the basis of modeling.” *System Analysis And Logistics* 2(28) (2021): 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.

10. 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.

11. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vychor v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010

12. Maiorov, N. N. and V. A. Fetisov. “Research of operational processes passenger services in the marine passenger terminal using simulation.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.

14. Maiorov, N. N. and V. A. Fetisov. “Planning work of maritime passenger terminals in terms of intensity of cruise ships calls.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 3 (2019): 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128.

15. Dobrovolskaya, A. A., N. N. Mayorov and M. R. Yazvenko. “Decision-making under uncertainty in forecasting the development of a sea passenger port based on the modeling of different priorities of ships.” *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy: Sbornik statey XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. V 3-kh chastyakh, Sankt-Peterburg, 29 maya — 02 2023 goda. Tom Chast' 3*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023: 107–112.

15. Maiorov, N. N. and M. R. Yazvenko. “Research of data generation options based on multi-scenario modelling for decision-making under uncertainty in the development of maritime passenger terminal.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Язвенко Максим Романович** —  
аспирант кафедры системного анализа  
и логистики  
Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического приборостроения  
190000, Россия, Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А  
E-mail: [YazvenkoM@guap.ru](mailto:YazvenkoM@guap.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Yazvenko Maksim Romanovich** —  
postgraduate of the system analysis  
and logistics department  
Saint-Petersburg State University of Aerospace  
Instrumentation  
SUAI, 67, Bolshaya Morskaia str.,  
Saint-Petersburg, 190000, Russia  
E-mail: [YazvenkoM@guap.ru](mailto:YazvenkoM@guap.ru)

*Статья поступила в редакцию 06 апреля 2025 г.  
Received: Apr. 6, 2025.*

## CONFIGURING A COMPLEX OF SPLINES WHEN APPROXIMATING THE NAVIGATIONAL ISOLINE WITH LINEAR PIECEWISE FUNCTIONALS

**I. V. Yuyukin**

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

*This paper proposes to consider a linear spline as a mathematical criterion for a line of position. In this context, the linear spline approximation is viewed dually: the spline is associated both with an analog of the line of position and simultaneously with a multi-link of the reconstructed navigational isoline. The spline gradient is interpreted as an enhanced concept of the classical gradient vector, differing in its construction along the normal to the spline segment approximating the isoline near the dead reckoning point. This approach ensures the realism of the multifactorial nature of probable directions of maximum increases in the navigation function by operating with a complex of spline gradients, which objectively reflects the situation of extreme observation accuracy as the most likely point of intersection of spline lines of position. It is noted that the concept of a spline gradient is recognized as a fundamental predicate determining the potential for a ship's movement during isolinear navigation, taking into account the changing geometric characteristics of the navigation parameter field. The estimation of navigation measurement accuracy is specified due to the variable configuration of the gradient complex's architecture. It seems reasonable to assume the hypothetical possibility of independent control of a ship's isolinear movement with special onboard equipment capable of continuously determining the values of the navigation isoline's parameters with synchronous fixation of the gradient fan, since the internal geometry of the ship's trajectory is fully characterized by navigation parameters in the generally accepted sense of navigation. It is pointed out that an alternative advantage of maintaining a vessel on an isoline navigation route is the technical ability to navigate by control signals derived from measurements of a complex of gradients without using additional information. The practical application of the gradient fan creates a precedent for organizing a parametric system in which the current true course and coordinates of an isolinearly moving vessel are functions of gradiometric measurements. The theoretical possibility of practical application of spline function theory to approximate the latest isolines is allowed, whose introduction into future navigation is associated with innovations in navigation technology. It is predicted that the proposed approach can also serve as mathematical support for an automated navigation system with artificial intelligence within the framework of unmanned navigation.*

*Key words: spline line of position, multi-link of the reconstructed isoline, complex of spline gradients, gradient fan, isolinear navigation, architecture of spline gradients, unmanned navigation.*

**For citation:**

Yuyukin, Igor V. "Configuring a complex of splines when approximating the navigational isoline with linear piecewise functionals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 365–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-365-383.

**УДК 656.61.052**

## КОНФИГУРИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СПЛАЙН-ГРАДИЕНТОВ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ НАВИГАЦИОННОЙ ИЗОЛИНИИ ЛИНЕЙНЫМИ КУСОЧНЫМИ ФУНКЦИОНАЛАМИ

**И. В. Ююкин**

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

*Предлагается воспринимать линейный сплайн как математический критерий линии положения. Линейная сплайн-аппроксимация при этом рассматривается в двойственном варианте: сплайн ассоциируется с аналогом линии положения и одновременно с многозвенником восстановленной навигационной изолинии. Сплайн-градиент интерпретируется как усовершенствованное понимание классического вектора*

градиента, имеющего отличие в построении по нормали к сплайновому фрагменту, аппроксимирующему изолинию в окрестности счислимой точки. При таком подходе обеспечивается реалистичность многофакторности вероятных направлений максимальных увеличений навигационной функции за счет оперирования комплексом сплайн-градиентов, что объективно отображает ситуацию предельной точности обсервации как вероятнейшей точки пересечения сплайновых линий положения. Отмечается, что понятие сплайн-градиента признано основополагающим предикатом, определяющим потенциал движения судна при изолинейном плавании с учетом меняющейся геометрической характеристики поля навигационных параметров. Конкретизирована оценка точности навигационных измерений за счет вариативного конфигурирования архитектуры комплекса градиентов. Представляется целесообразным предположение о гипотетической возможности независимого контроля изолинейного перемещения судна при наличии на борту специальной аппаратуры, способной постоянно определять значения параметров навигационной изолинии с синхронной фиксацией веера градиентов, так как внутренняя геометрия траектории судна полностью характеризуется навигационными параметрами в общепринятом в навигации смысле. Указывается, что альтернативным преимуществом удержания судна на маршруте изолинейного плавания является техническая возможность ориентирования на управляющий сигнал от измерений значений комплекса градиентов без использования дополнительной информации. Применение веера градиентов в практическом аспекте создает прецедент организации параметрической системы, в которой текущий истинный курс и координаты изолинейно движущегося судна являются функциями градиентометрических измерений. Допускается теоретическая возможность практического применения теории сплайн-функций к приближению новейших изолиний, внедрение которых в навигацию будущего связано с инновациями технических средств судовождения. Прогнозируется, что предлагаемый подход может быть использован как математическое обеспечение автоматизированной системы судовождения с искусственным интеллектом в рамках концепции безэкипажного судоходства.

*Ключевые слова:* сплайновая линия положения, многозвенник восстановленной изолинии, комплекс сплайн-градиентов, веер градиентов, изолинейное плавание, архитектура сплайн-градиентов, безэкипажное судоходство.

**Для цитирования:**

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.

### Введение (Introduction)

Подробный анализ математической процедуры любой обсервации показывает, что все существующие в настоящее время способы позиционирования по фундаментальной сути своей основаны на навигационных изолиниях. Канонизация понятия градиента в традиционных задачах обработки навигационной информации позволяет определять место судна на единообразной методологической основе упрощенным геометрическим способом. В классической трактовке математических основ судовождения считается, что по всей изолинии значение навигационной функции остается постоянным, изменяясь только при переходе с одной изолинии на другую. Максимальное изменение навигационной функции принято условно характеризовать понятием *вектора градиента*, направленного в сторону возрастания навигационной функции по нормали к линии положения, заменяющей изолинию в районе счислимой точки. Чем теснее расположены смежные изолинии друг к другу, тем быстрее меняется навигационная функция в данном районе и это изменение удобно характеризовать вектором градиента<sup>1</sup>. Таким образом, градиент, по сути, является векторной характеристикой скалярного поля навигационных параметров.

Постулат линии положения математически рассматривается как результат разложения уравнения изолинии в ряд Тейлора с удержанием линейных элементов, что отождествляется с так называемой *операцией линеаризации навигационной изолинии*. В научных публикациях обычно приводится абстрактное утверждение о единственности вектора градиента на всю конфигурацию навигационной изолинии, и во всех геометрических интерпретациях данная ситуация по умолчанию находит свое аналогичное условное отображение.

<sup>1</sup> Ющенко А. П. Способ линий положения и точность определения места: современные способы навигации. М.: Морской транспорт, 1961. С. 7–26.

С позиций стандартного подхода используются два варианта спрямления изолиний: проведением касательной к изолинии в окрестности счислимого места судна и посредством секущей хорды, проходящей через две близлежащие точки изолинии в непосредственной близости от счислимого местоположения. Традиционно под такими прямыми линиями понимаются в классической навигации *линии положения*, но в интерпретации д-ра техн. наук, проф. В. П. Кожухова прямая — это прежде всего математический критерий линии положения, а не просто спрямление изолинии ради простоты ее построения на карте<sup>2</sup>.

В ситуации применения сплайна первой степени нивелируются различия двух вариантов спрямления фрагментов изолиний, так как линейную сплайн-аппроксимацию можно интерпретировать двояко: и как линейный сплайн, рассматриваемый в качестве варианта линии положения, и как видоизмененный фрагмент восстановленной навигационной изолинии одновременно. При практическом применении *способа линий положения* исторически акцентировалась их приспособленность к графическим построениям в меркаторской проекции. Для этого уравнения линий положения приводились к нормальному виду путем поэлементного деления на модули градиентов, что позволяло единообразно изображать их независимо от геометрических свойств. По мнению инженера контр-адмирала В. В. Каврайского, мореплавателя и путешественника, не имевшим возможности сделать два наблюдения, необходимых для полного определения места, даже одна линия положения дает полезные указания, между тем как без нанесения этой линии на карту наблюдение остается бесплодным<sup>3</sup>. Идея *линий равного значения* была изобретена капитаном американского парусника «Кабот» Т. Х. Сомнером в штурманской рубке во время шторма в проливе Святого Георга 17 декабря 1837 г. [1].

Другой прием графического способа определения места на море был опубликован М. А. Акимовым в 1849 г. [2]. Принципиально усовершенствовал метод высотных линий положения французский адмирал Марк Сент-Илер, предложивший в 1873 г. их прокладку от счислимого места. Этот улучшенный подход и в условиях современности является основным способом астрономического определения места судна в море [3]. С целью аналитического обоснования определения местоположения наблюдателя из астрономических, геодезических или навигационных определений разного рода можно применить *метод линий положения*.

На практике данный метод важен тем, что позволяет простейшим и нагляднейшим путем исследовать точность решения задачи определения места судна. При трех фиксированных измерениях пеленга истинное место может оказаться не только в любой точке внутри треугольника, но и за пределами площади фигуры погрешностей. При наличии одних систематических ошибок вероятнейшее место получается на пересечении биссектрис внутренних или внешних углов треугольника погрешностей, в зависимости от того как направлены градиенты навигационной функции.

В условиях современности благодаря развитию вычислительной техники появляется реальная возможность оперативно выполнять профессиональную геометрическую визуализацию оригинальной изолинии на экране бортового компьютера или решать задачу сугубо аналитически с получением результата в цифровом варианте при вычислительной реализации каждой точки восстановленной линии равных значений навигационных параметров. При этом всевозможные аффилированные теоретические допущения для упрощения расчетов перестают играть существенную роль в связи с существенным развитием вычислительных средств.

Выдвигается гипотеза практической возможности осуществлять построение мгновенного вектора градиента вместо линии положения к ее сплайновой аналогии, заменяющей оригинальную изолинию многозвенником из сопряженных сплайновых прямых линий на основе ассоциации с классическими постулатами при параллельной организации комплекса градиентов на одну изолинию. Вопрос реальной применимости сплайн-градиента может иметь важное прикладное

<sup>2</sup> Кожухов В. П. Об изолиниях и линиях положения / Судовождение: сб. науч. тр. Вып. 24. М.: ВО «Морфлот», 1979. С. 3–5.

<sup>3</sup> Каврайский В. В. Обобщенный способ линий положения // Записки по гидрографии. № 2, 1941/43. С. 5–17.

значение в современной практике судовождения при целенаправленном рассмотрении конкретной постановки задачи получения точной обсервации.

Целью работы является реализация следующих задач:

1. Теоретическое подтверждение гипотезы о принципиальной возможности использования линейного сплайна для спрямления навигационной изолинии в качестве имитации сплайновой линии положения при одновременной фрагментарной аппроксимации навигационной изолинии как таковой.
2. Обоснование параметризации внутренней геометрии навигационных изолиний с целью создания базовой основы программированного изолинейного плавания судна в автономном режиме.
3. Введение новой трактовки понятия о сплайн-градиенте на основе алгоритмизации навигационных задач на основе методов кусочной аппроксимации.
4. Рассмотрение практической применимости конфигурирования комплекса сплайн-градиентов при спрямлении навигационной изолинии сегментными линейными функционалами.
5. Объяснение теоретической возможности практического применения теории сплайн-функций к приближению новейших изолиний, внедрение которых прогнозируется в навигацию будущего с прогрессивным развитием технических средств судовождения.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Классические методы обработки навигационной информации, во многом опирающиеся на конечные многочлены, не являются универсальными в условиях современности, требуя во многих случаях специальных приемов при практическом применении [4]. Основная проблема использования традиционных алгоритмов заключается в том, что они не могут рассматриваться как способы универсальной аппроксимации при исключении возможности потенциального моделирования реально существующих зависимостей с любой наперед заданной степенью точности [5]. Исследование новых направлений в области автоматизации судовождения представляется несомненно актуальным. Основные качества приближения навигационных функций сплайнами: *гладкость, минимальность нормы, практическая локальность, абсолютная сходимостъ результатов и относительная простота вычислительных реализаций*, определяют их ведущее место в решении важнейших задач обработки навигационной информации. Подход к проблемам автоматизации судовождения с позиций методов сплайн-функций можно понимать как развитие *общей теории навигационных изолиний и обобщенной теории линий положения* одновременно с применением достижений специального раздела современной математики.

Перспективным направлением разработки адаптивных систем управления являются методы судовождения с применением зоны безопасности как свободного пространства вокруг судна для обеспечения информативного маршрутного движения судна. Следует отметить, что в качестве меры деформации конфигурации зоны навигационной безопасности может эффективно использоваться градиент, под которым в данном случае понимается предикат пространственного вектора, направленный перпендикулярно к поверхности зоны безопасности в данной точке и характеризующий скорость изменения ее положения с целью обеспечения режима движения и управления судном в пределах гарантированной полосы проводки судна [6]. Такие ключевые задачи навигации, как формализация навигационной обстановки и автоматическое построение реализуемого маршрута судна с мониторинговым контролем системой управления, требуют новых математических подходов к их решению.

Представляется целесообразным в вопросах обработки навигационной информации апробировать альтернативный сплайновый метод замены изолинии группой сегментных прямых линий с определением градиента к каждой из них. При этом сама интерполяция любых навигационных изолиний рассматривается как задача приближенного сплайнового восстановления дискретных измерений навигационных параметров, отягощенных случайными погрешностями в узловых значениях на сетке аргументов навигационной функции. Естественным образом возникает алгоритмическая ситуация уместной применимости сплайна первой степени в решении навигационных задач на основе одновременно видоизмененных *методов линий положения и изолиний*.

Сплайн первой степени геометрически представляет собой ломаную линию, проходящую через полюса интерполяции за счет конструирования геометрии объекта на основе комплексов линейного сплайнового базиса (рис. 1). За внешней простотой данного рисунка скрывается специфичный вариант из арсенала сплайновых средств, позволяющий успешно решить важную задачу судовождения с допустимыми показателями точности.

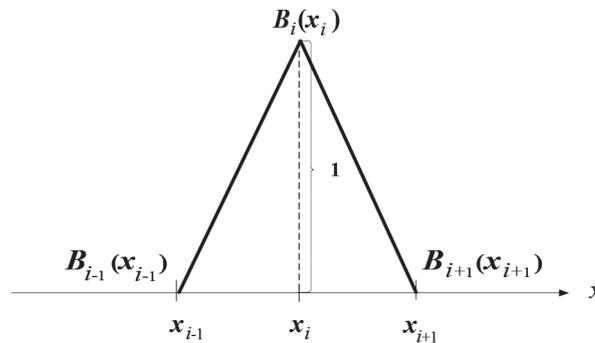


Рис. 1. Базис единичного линейного сплайна

Практическое преимущество сплайна первой степени заключается в том, что он формализуется по явным формулам, не требуя задания *краевых условий*. Линейный сплайн с позиций теории приближения можно интерпретировать как минимальный сплайн возможной максимальной «гладкости» [7]. Под математической «гладкостью» подразумевается успешность функциональной дифференцируемости в аспекте плавности восстановленной навигационной изолинии [8]. Гладкая «склейка» последовательных сплайновых групп обеспечивается оптимальным заданием алгоритмических условий непрерывности производных аппроксимированной навигационной функции в местах стыковки кусочных отрезков. Исходя из внутренних геометрических соображений, кусочный линейный функционал представляет собой в физическом аналоге нить, которую условно тянут в разные стороны, при этом сама нить проходит между точечными алгоритмическими ограничениями по точности, неизбежно вырождаясь в тривиальную прямую линию.

Оперирование с многозвенниками является эффективным с точки зрения проведения вычислений. Расчет сплайн-функций по схеме Горнера сопряжен только с такими математическими операциями, как умножение и сложение, что обуславливает высокое быстродействие конечных решений. Быстродействие обеспечивается за счет элементарного обращения к фиксированным ячейкам оперативной памяти с хранящимися предварительно рассчитанными промежуточными значениями. Подход с позиций теории приближения функций гарантирует достижение быстродействия вычислительных реализаций при наличии возможности получения результата в масштабе реального времени.

Критически оцениваемые определенные недостатки линейной сплайн-интерполяции не позволили использовать данный математический атрибут при решении прикладных задач судовождения, но способствовали нахождению самостоятельного специфичного применения сплайна первой степени в линеаризации навигационной изолинии с синхронной организацией комплексного атрибута сплайн-градиента. Сплайны представляют собой универсальное математическое средство восстановления любых изолиний по дискретным измерениям навигационных параметров ввиду принципиальной независимости от конкретного вида навигационной функции.

Фактическая реализация градиентного подхода может быть различной и вектор градиента может быть задействован в алгоритме в косвенных признаках, но его аналоговая интерпретация применяется на традиционной основе в алгоритмической процедуре. Примером неявного использования вектора градиента может служить так называемый *метод градиентной заливки* как ускоренный способ обозначения судходного фарватера для картографированных водных путей [9]. Тенденция изменения насыщенности цветовой палитры морской акватории электронной карты служит аналогом вектора градиента, указывающего на изменение батиметрической обстановки в соответствии с его направлением.

Градиент условно фиксирует обозначение не только опорных значений батиметрии, но и интерполированные глубины в диапазоне между узловыми точками. Градиентная заливка позволяет судоводителю экстренно оценить рельеф дна по интенсивности цветовой гаммы с минимальными временными требованиями на ориентирование, что существенно повышает безопасность судовождения при следовании судна фарватером, позволяя в условиях дефицита времени принимать верное управленческое решение по маневрированию судна. Новая трактовка универсальности комплекса градиентов с единых позиций теории сплайн-функций создает возможность прогнозирования оперированием новейшими неисследованными изолиниями, которые в перспективе могут появиться в ходе технологических инноваций судовождения.

### Результаты (Results)

При постановке задачи генерирования изолиний сплайн-функциями автоматически появляется теоретическая допустимость существования комплекса градиентов, каждый из которых организован по каноническому правилу математических основ судовождения, но с персональной ортогональной ориентировкой на каждом отрезке кусочной ломаной линии в результирующей процедуре аппроксимации изолинии на всей области определения навигационной функции. Тем самым вводится понятие сплайн-градиента как расширенное понимание классического вектора градиента с единственным отличием в построении по нормали к кусочному фрагменту, аппроксимирующему изолинию в данной окрестности, а не к условной обобщенной касательной линии или хорде. В данном случае появляется фактическая возможность оперирования веером сплайн-градиентов, что позволяет предположить практическую реалистичность математической сути прогрессивного метода при обработке навигационной информации в рамках сплайновой концепции.

В соответствии с поиском альтернативной точки зрения по вопросам инновационного понимания проблем обработки навигационной информации выдвигается гипотеза о допустимости парадигмы изменчивости ориентации вектора градиента в сегментах интерполяции навигационной изолинии при условии сохранения стандартного значения модуля градиента. Данное исследование в развитие гипотетического предположения определяет исключительную применимость методов сплайн-функций для новой трактовки понятия градиента и формирования принципов практического применения нового термина в современной обработке навигационной информации.

Понятие *сплайн-градиента* можно признать основополагающим феноменом, определяющим потенциал движения судна при изолинейном плавании с учетом меняющейся геометрической характеристики поля навигационных параметров. Гипотеза о монопольном статусе градиента навигационного поля определяет его в качестве основного параметра навигационных измерений и единственного демаскирующего фактора приращенной навигационной функции при его активном поиске [10]. Сплайн-градиент позволяет эффективно оценивать манипулирование аппроксимированной изолинии в окрестности определяемой позиции судна при изменении навигационного параметра, а, следовательно, с применением понятия сплайн-градиента оперативно решаются важнейшие задачи судовождения: уточненное определение места судна и априорная оценка его точности.

Градиент является векторной характеристикой сплайна как аппроксиматора навигационной изолинии, инвариантного преобразования координатных систем при переходе от локальных прямоугольных координат к географической широте и долготе. Сплайн-градиент также является векторной величиной, определяющей направление наискорейшего увеличения аппроксимированного навигационного параметра и численно равной первой производной восстановленного параметра по направлению нормали к линейному сплайну на каждом сеточном сегменте.

Модуль сплайн-градиента теоретически согласуется с классическим понятием градиента как производной навигационной функции по нормали к синтезированной сплайн-функциями изолинии, но сфокусированным на конкретном аппроксимационном интервале:

$$|\vec{g}| = \frac{dU}{dn}, \quad (1)$$

где  $|\vec{g}|$  — модуль сплайн-градиента;

$dU$  — производная от навигационной функции по нормали на фрагментарном отрезке аппроксимации;

$dn$  — дифференциал функционального приращения при параллельном переносе линии положения на аппроксимационном сегменте.

При переходе к бесконечно малым приращениям формула (1) модифицируется простым и одновременно содержательным способом с абстрагированием от понятия *предела* в новой трансформации следующей форме записи:

$$|\vec{g}| = \frac{\Delta U}{\Delta n}, \quad (2)$$

$\Delta U$  — приращение навигационной функции на фрагментарном отрезке аппроксимации;

$\Delta n$  — параллельный перенос линии положения на аппроксимационном сегменте по ортогональному направлению сплайн-градиента;

где  $|\vec{g}|$  — модуль сплайн-градиента.

Бесконечно малое приращение навигационного параметра  $\Delta U$  соответствует бесконечно малому приращению  $\Delta n$  параллельного смещения линии положения по нормали к изолинии из счислимого места судна в обсервованное.

По математической сути модуль сплайн-градиента есть коэффициент пропорциональности между переносом и обусловленным им поступательным перемещением сплайновой линии положения. Чем меньше расстояние  $\Delta n$  между смежными аппроксимированными изолиниями при фиксированном приращении синтезированной линейными сплайнами навигационной функции  $\Delta U$ , тем быстрее меняется восстановленное значение функции  $U$  в окрестности определения координат судна. Чем больше величина модуля сплайн-градиента  $|\vec{g}|$ , тем меньше смещение  $\Delta n$  сплайновой линии положения при одинаковой погрешности приближенного навигационного параметра  $\Delta U$  и тем точнее производится финальное определение места судна, так как индивидуальная погрешность линии положения напрямую зависит от ошибок наблюдения.

Таким образом, сплайн-градиент позволяет связать погрешность аппроксимированного навигационного параметра с погрешностью определения линии положения. Совместное действие случайной и систематической погрешностей при этом интерпретируется как некоторое дополнительное приращение  $\Delta U$  навигационного параметра. Необходимо отметить, что погрешность линии положения зависит не только от погрешности измерения навигационного параметра, но и от точности ориентации вектора сплайн-градиента и расчета его модуля. Вследствие этого сплайн-градиент можно оценивать как феномен, определяющий фактическую точность местоположения. Поэтому при анализе архитектуры веера сплайн-градиентов необходимо теоретически учитывать факт локального влияния каждого вектора градиента погрешности измерений навигационного параметра [11]. Для уменьшения погрешности местоопределения необходимо стремиться к количественному расширению комплекса сплайн-градиентов в поле навигационных параметров.

Градиентный подход к проблемам обработки навигационной информации при непосредственном использовании методов сплайн-функций можно понимать как попытку развития *общей теории навигационных изолиний* и *обобщенной теории линий положения* одновременно с применением достижений прогрессивной математики. Представляется целесообразным в вопросах обработки навигационной информации апробировать практическое применение спектра градиентов навигационной функции. В классическом варианте максимальное изменение навигационной функции принято характеризовать понятием *обобщенного вектора градиента*, направленного в сторону возрастания навигационной функции по нормали к линии положения, заменяющей изолинию в районе счислимой точки. По В. В. Каврайскому градиент понимается как двумерный вектор, характеризующий наибольшую скорость изменения навигационного параметра на единицу

перемещения плоского изображения изолинии по нормали<sup>4</sup>. Замена этого изображения отрезком касательной в виде *линии положения* в окрестности определяющей точки упрощает графоаналитический прием ее построения, а также нахождение места судна в точке пересечения прямых линий. При этом автор идеи *обобщенной теории линий положения* исходит из геометрических свойств изолинии, а не из какой-либо единой формулы или метода. Сам термин обобщенности подразумевает применимость метода к любым способам определения места судна.

Толкование понятия линии положения только как касательной к изолинии формировалось в течение последних ста лет, но автор этой идеи В. В. Каврайский изначально рассматривал касательную как один из ее вариантов с целью унификации графического построения<sup>5</sup>. Формализуя выражения для элементов градиента линии положения, в каждом отдельном случае ученый пользовался различными вспомогательными приемами геометрического характера<sup>6</sup>. При этом в достаточно малой области всякая поверхность рассматривалась как плоскость, изолинии считались параллельными прямыми, называемыми, по обыкновению, линиями положения, а направление градиента определялось по направлению нормали к изолинии, обращенной в сторону возрастания навигационной функции. Общая теория навигационных изолиний как основа метода линий положения, естественно, должна включать единый способ для нахождения вектора градиента произвольной изолинии при независимости от ее геометрических свойств [12].

При постановке задачи генерирования изолиний сплайн-функциями автоматически появляется теоретическая допустимость феномена существования веера градиентов в области определения навигационной функции, каждый из которых организован по каноническому правилу математических основ судовождения, но с персональной ортогональной ориентировкой на каждом отрезке кусочной ломаной линии в результирующей процедуре аппроксимации изолинии. Данное исследование в развитие допустимого предположения определяет исключительную применимость методов сплайн-функций для новой трактовки понятия градиента и формирования принципов практического применения нового термина в обработке навигационной информации. При исследовании введенного понятия сплайн-градиента необходимо отметить, что на традиционных поясняющих репродукциях в публикациях по судовождению демонстрируются, как правило, простейшие изолинии при наличии глобального вектора градиента на всю конфигурацию представленной изолинии на основе необоснованного предположения о стратегической неизменности вектора градиента в пределах всей геометрии изолинии. В связи с обозначенным фактом особенную актуальность предлагаемый подход приобретает в ситуации оперирования сложными или искаженными изолиниями. Возникновение искаженной изолинии возможно при использовании дифференциального режима спутниковой навигации, характеризующегося тем, что оперативно учитываются специальные поправки в реальном времени для повышения точности определения позиционирования, что с геометрической точки зрения неизбежно вызовет физическую трансформацию любой навигационной изолинии [13].

В качестве примера аппроксимации сложной эмпирической кривой можно привести восстановленную методами сплайн-функций безопасную изобату, практически являющуюся гарантом от посадки судна на мель в морской акватории, находящейся за ее контуром. При любых сложностях математической формализации 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 двусмысленного предоставления гидрографической информации [14]. Для практического решения задачи выполняются специальные математические операции частичного деформирования изолинии, обеспечивающие локальную коррекцию изобаты.

<sup>4</sup> Вульфвич Б. А. Методы расчета основных элементов навигационных изолиний. М.: Пищевая промышленность, 1974. 156 с.

<sup>5</sup> Кондрашихин В. Т. Определение места судна. М.: Транспорт, 1989. 230 с.

<sup>6</sup> Каврайский В. В. Линии положения и их применение. Избранные труды. Т. 1. Л.: УНГС ВМФ, 1956. С. 283–306.

Деформации изобаты могут быть устранены путем локального смещения линии в сторону более глубокой воды за счет реализации математической операции сглаживания. Процедура сглаживания выполняется путем устранения естественных незначительных колебаний синтезированной изолинии при сохранении информации о форме и ориентации алгебраической кривой. Последующее сглаживание изолинии выполняется путем сохранения контрольных точек кривой всегда на глубокой стороне безопасной изобаты. Сглаживание используется для улучшения эстетических характеристик с целью получения разборчивой четкости плоской кривой путем ослабления локальных осцилляций изобаты. Процесс сглаживания включает определенное упрощение формы изолинии за счет устранения неконструктивных деталей с целью сохранения основной информации о плавности формы плоской линии. Сглаживание выполняется путем сохранения базисных точек сплайновой атрибутики всегда на глубокой стороне исходной линии, чтобы финальный результат соответствовал безопасности представления гидрографической информации за счет оперативного формирования изменения сложного геометрического профиля электронной изобаты. Параметр сглаживания выступает как эмпирический компромисс между точностью синтезирования изолинии и геометрическим правдоподобием алгебраической кривой по принципу виртуального ключа, удачно повернув который можно получить удовлетворительную аппроксимацию измерительных данных. Варьирование параметром сглаживания позволяет практически решать задачу аппроксимации навигационных изолиний любой степени геометрической сложности.

Искусственная трассировка изобат выполняется таким образом, чтобы навигационная информация по своей сути была абсолютно безопасной для судовождения при выполнении условия сохранения эстетического качества навигационной карты. Оперативное управление формой моделируемой изобаты осуществляется благодаря плавности, гладкости и заданию оптимального количества характеристических точек с допустимым вводом дополнительных сеточных узлов аппроксимации для повышения адаптивности и гибкости сплайновой модели за счет своей вычислительной эффективности при сегментировании контурных линий с высокой сложностью. Практическое использование аппроксимированных данных о рельефе дна с высоким уровнем пространственного разрешения может позволить повысить надежность безопасности судовождения. При правильном навигационном использовании актуальной безопасной изобаты вахтенному помощнику обеспечивается транзитный фарватер, в котором гарантируется безопасное движение судна.

В практическом варианте линейный сплайн на каждом сеточном отрезке аргумента навигационной функции формализуется многочленом первой степени, который является фактической заменой изолинии на конкретном сегменте аппроксимации:

$$S_i(x) = A_i + B_i(x - x_i); \quad i = 1, \dots, N; \quad x_i < x < x_{i+1}, \quad (3)$$

где  $A_i$ ,  $B_i$  — искомые скалярные сплайновые коэффициенты;  
 $x$  — аргумент навигационной функции;  
 $N$  — максимальное число сеточных узлов.

Целесообразность применения линейного функционала обуславливается основной точностью приближения до сотых долей числовых реализаций [15], что можно признать достаточным в практическом смысле, так как фиксирование обсервации, например, на путевой бумажной карте, как правило, глазомерно выполняется судоводителем с реальной точностью до десятых долей минуты при оперировании с географическими координатами.

Необходимо учитывать тот факт, что увеличение степени сплайна не всегда способствует улучшению аппроксимации. Следовательно, применение линейного сплайнового функционала в рассматриваемой ситуации является тактически оправданным. Точность приближения сплайном может быть дополнительно улучшена при условии применения оптимизационных схем организации расположения узлов аппроксимации [16]. Стратегический результат линейной аппроксимации градиента целевой функции заключается в том, что глобальная ошибка наилучшего приближения эквивалентна соответствующей сумме погрешностей локального приближения

каждого кусочного элемента [17]. Требование непрерывности не снижает оптимальную локальную аппроксимируемость, а конечный результат подразумевает границы погрешности в терминах кусочной регулярности во всем допустимом диапазоне гладкости. Положительными аспектами применения сплайнов первой степени являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость расчетных процедур. Линейная кусочная структура позволяет создавать локальные базы данных, относительно простые в реализации. Последнее приводит к линейным системам с разреженными матрицами, которые могут решаться с эффективной вычислительной способностью.

Рассмотрим теоретический процесс спрямления навигационной изолинии линейным функционалом с организацией веера сплайн-градиентов на гипотетическом примере. Сплайн первой степени, приведенный на рис. 2, представляет собой ломаную линию, сегментарным образом проходящую через узловые точки произвольной изолинии за счет правильного подбора внутренних геометрических свойств сплайна на основе комплексирования выгодных условий интерполяции. На рисунке в локальной прямоугольной левой декартовой системе координат  $XOY$  показана  $U$  как абстрактная навигационная изолиния, традиционно характеризующаяся тем, что в каждой точке изолинии значение навигационной функции  $U = f(E, y)$  остается постоянным.

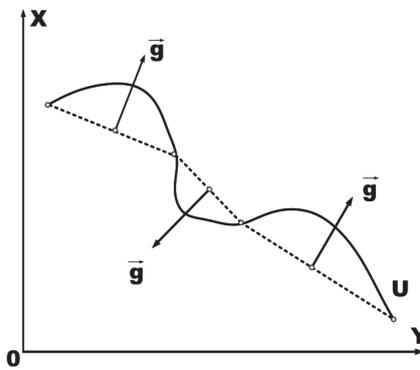


Рис. 2. Гипотетическая конфигурация комплекса сплайн-градиентов

Пунктирной линией показан многозвенник последовательности линейных сплайнов, аппроксимирующих данную изолинию. В смоделированном случае сплайн «склеен» из трех прямолинейных фрагментов при общем количестве узлов, равном четырем. Сплайн-градиент интерпретируется как вектор, направленный ортогонально к каждому линейному сплайну, аппроксимирующему фрагмент навигационной изолинии в сторону смещения изолинии при положительном приращении навигационного параметра, причем модуль этого вектора традиционно характеризует максимальную скорость изменения параметра в фиксированной точке приложения (см. рис. 2). Триумвират сплайн-градиентов автоматически формируется на основе построения сплайнового градиента на каждом сегменте приближения изолинии в средней его точке.

На каждом кусочном отрезке сплайновой ломаной линии обозначен вектор сплайн-градиента  $\vec{g}$ . В полной комбинации отдельные сплайн-градиенты  $\vec{g}$  организуют комплексный веер сплайн-градиентов при общем количестве трех векторов как допустимый символ интерпретации реалистичности идеи изменения ориентации каждого градиента от точки к точке в гипотетической аппроксимированной изолинии  $U$ . Стрелка над обозначением  $\vec{g}$  показывает, что речь идет непосредственно о математическом векторе с такими известными параметрами, как абсолютная величина сплайн-градиента  $|\vec{g}|$  и его направление.

Комбинацией сплайн-градиентов можно варьировать за счет масштабирования сеточными отрезками при вводе дополнительных узлов. На рис. 3 интерпретируется ситуация введения по одному дополнительному узлу на первом и третьем сегменте сплайновой конструкции с целью организации расширенного спектра сплайн-градиентов при синхронном увеличении их общего количества до пяти.

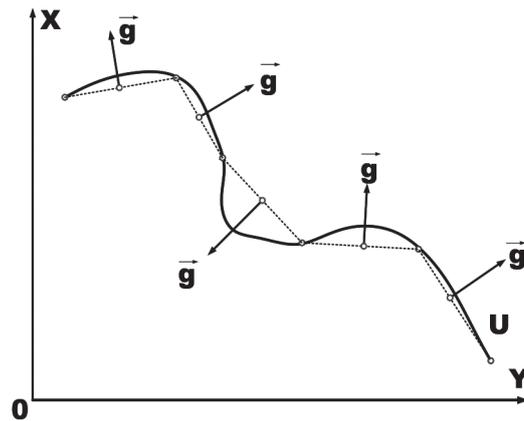


Рис. 3. Масштабирование сплайновой ломаной за счет дополнительных узлов

В модернизированном случае (см. рис. 3) эффективно вводить дополнительные узлы одновременно слева и справа на сеточных отрезках для обеспечения лучших условий сплайнового приближения изолинии [18]. В обновленной версии общее число уменьшенных «склеенных» кусочных фрагментов сплайнового конгломерата, показанных на рисунке пунктирной линией, равно пяти при шести узловых точках. Приведенная геометрическая интерпретация в большей мере соответствует физической картине понимания сплайн-градиента в отличие от необоснованного отождествления градиента условному абстрактному вектору при стандартном подходе, так как необоснованный параллелизм изолиний не предусмотрен с позиций метода сплайн-функций. Комплекс градиентов позволяет улучшить точность определения места судна за счет целенаправленного инвариантного перехода из пространства навигационных параметров в пространство определяемых координат.

На рис. 4 смоделирована гипотетическая задача определения места судна сравнительной композиции: классическим способом линий положения (графические построения, выполненные в синем цвете) и с использованием комплекса сплайн-градиентов (графические построения в красном цвете).

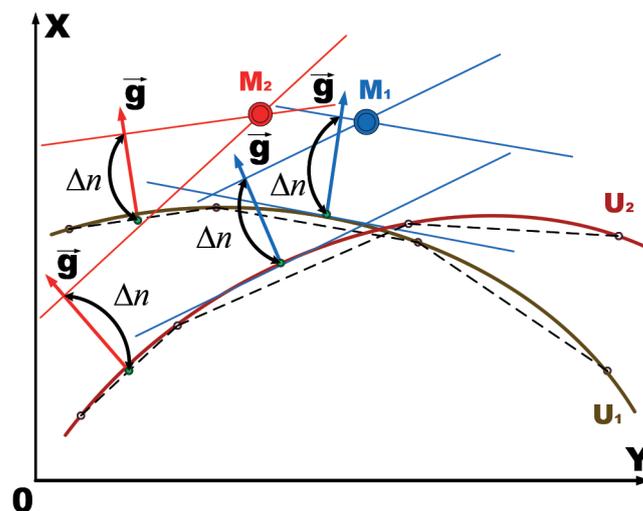


Рис. 4. Имитационное моделирование различия классического определения места судна с обсервацией по градиентному методу сплайн-функций

Пусть даны две абстрактные изолинии  $U_1$  и  $U_2$  в локальной системе координат с начальным отсчетом, традиционно совпадающим со счислимым местом. При классическом подходе каждая из изолиний заменяется касательной в точке, которая является стратегически близкой к счислимой

точке с последующим параллельным смещением этой прямой на величину переноса  $\Delta l$  ортогонально направлению стандартного градиента. Точка пересечения двух синих линий положения соответствует  $M_1$  как классической эпизодической обсервации. Архитектура комплекса сплайн-градиентов позволяет выбрать фактически ближайший к счислимой точке сплайн-градиент и сплайновую линию положения с последующим повторением процедуры определения места судна в общепринятом в математических основах судовождения понимании и получить теоретически более точную сплайновую  $M_2$  обсервацию, геометрически сформированную на основе сплайн-градиентов, тактически более близких к счислимому месту. Разница между двумя подходами графически выражается отрезком  $[M_1M_2]$  как показателем методической погрешности классического метода в сравнении с предлагаемым подходом (см. рис. 4). Отрезок  $[M_1M_2]$  интерпретируется как метрика измерений градиентного комплекса в имитационном моделировании различия классического определения места судна с обсервацией по градиентному методу сплайн-функций. При этом необходимо отметить, что стандартный градиент реально получается геометрически более удаленным от счислимой точки за счет условности его применения, логически следующей из формального предположения о неизменности его ориентации на всем контуре навигационной изолинии. Следовательно, в условиях применимости современной концепции обсервационного счисления стандартный градиент оценивается как постулат метрики  $[M_1M_2]$  потерянной точности навигационных измерений. Комплекс градиентов реалистичным образом определяет общий характер любой изолинии с учетом ее асимптотических приближений и точно формулирует изометрическую конфигурацию линии равных значений навигационных параметров.

Фактическое перемещение любого судна происходит в трехмерном навигационном пространстве по эквипотенциальной поверхности земного поля тяжести. Морской подвижный объект движется по водной акватории, визуальной ассоциируемой судоводителем с парадигмой плоскостного судовождения по прямой аналогии с картинной навигацией по морской навигационной карте. При этом любой регион плавания является фрагментом реальной поверхности нашей планеты, а следовательно, фактическое перемещение судна должно концептуально соотноситься с аксиоматикой Евклида о природной системе пространственного счисления [19]. Маршрутное плавание, ориентированное на геодезическую основу геоида, необходимо рассматривать геометрически в рамках концепции навигационного пространства. При этом каждая мгновенная позиция судна в евклидовом пространстве фиксируется тремя координатами, а не двумя, как это традиционно принято считать при практической работе штурмана. Абстрагированная вертикальная координата современного судовождения определяет высотное положение судна как отклонение в данной точке евклидова пространства уровенной изоповерхности геоида от условной стандартизированной сфероидной поверхности в упрощенном варианте. Однако третью координату обычно используют только в прибрежном плавании при учете влияния приливоотливных явлений, определяющих безаварийное прохождение судна в стесненных навигационных обстоятельствах.

На практике судоводитель практически учитывает вертикальность позиции судна в традиционной ситуации использования Таблиц приливов или их электронных аналогов для расчета безопасного транзитного запаса глубины под килем. Классические географические координаты в восприятии вахтенного помощника обычно трансформируются в ассоциацию плоскостной парадигмы навигации [20], но действительное навигационное пространство определяется трехкоординатным позиционированием судна по сложной грушевидной фигуре геоида, совпадающей с уровенной поверхностью при мысленном абстрагировании от существования материков. Любое игнорирование концепцией навигационного пространства может являться скрытой угрозой возможной математически запрограммированной аварии.

Навигационное пространство характеризуется евклидовой метрикой, практически используемой в судовождении в виде оптимальной траектории, состоящей из отрезков геодезических линий, кратчайшим образом соединяющих точки маршрутизации судна по изоповерхности референц-эллипсоида как стилизованной замены геоида. Прямолинейное движение судна по локсодромии на карте в меркаторской проекции является, по сути, абстрактной геометрией, поэтому

стремление к упрощению объясняется сопутствующей причиной применимости в практических целях простого математического аппарата в границах ограниченной морской акватории. По условной схеме линеаризации действительную геоидную форму Земли заменяют оптимально подобранной по размерам и ориентировке правильной фигурой с известной формализацией — эллипсоидом вращения, затем с учетом искажений переходят к сфере в минимальном варианте аппроксимации, а от глобуса — к плоскости. Плоская модель навигационного пространства в привычном судоводительском понимании — это классическая бумажная карта в проекции Меркатора, которая на протяжении ряда столетий находила традиционное применение для повседневного использования.

С развитием инновационных компьютерных технологий появилась реальная возможность отказаться от подхода линеаризации и применять на водном транспорте такие фактические объекты, как интерполированные изолинии [21] и аппроксимированные изоповерхности [22]. При программной реализации в бортовом компьютере алгоритмов на основе разработанной технологии теории приближения функций становится возможным оперировать с абсолютной точностью практической навигации, отказавшись от сомнительных математических стилизаций. Сплайновый подход находится в ассоциативной логике с идеями аналитического расчета вероятнейшего места судна по синтезированным изолиниям без непосредственного использования обобщенного метода линий положения с целью исключения методической погрешности в принципе [23].

В практическом применении можно считать, что комплекс сплайн-градиентов обеспечивает реалистичность геометрической наглядной интерпретации многофакторности вероятных направлений положительных приращений навигационной функции, что реалистично отображает ситуацию предельной точности оценки фиксирования линии положения, а следовательно, в конечном итоге, и самой обсервации как вероятнейшей точки пересечения сплайновых прямых в одномерном сценарии. Непосредственно линейный сплайн в связи с этим реализуется как математический критерий синтезированной линии положения в строгом соответствии с терминологией д-ра техн. наук, проф. В. П. Кожухова в отличие от упрощенного понимания линейного сплайна как обычного средства спрямления изолинии для удобства графического построения на морской карте.

Исследование мгновенной ориентации вектора градиента как основного элемента навигационной изолинии с учетом специфики соответствующей линии положения может стать важнейшим атрибутом для практической организации *изолинейного плавания*. Формализованная методами сплайн-функций навигационная изолиния создает прецедент для конструирования технического устройства, позволяющего осуществлять программированное плавание нового типа.

Изолинейное плавание, ориентированное на практическое использование комплекса сплайн-градиентов, может быть эффективно использовано в непредсказуемых условиях современного мореплавания в зонах неустойчивого приема сигналов спутниковых систем при различных форс-мажорных обстоятельствах и природных катаклизмах. Существенным преимуществом удержания судна на электронном маршруте изолинейного плавания является возможность технического ориентирования на альтернативный управляющий сигнал на основе имеющихся сведений об измеренных значениях комплекса градиентов без использования дополнительной традиционной информации. Применение комплекса градиентов в практическом аспекте создает возможность фактической организации изолинейной натурально-параметрической системы, в которой текущий истинный курс и географические координаты изолинейно движущегося судна являются функциями градиентометрических измерений. Цель изолинейного плавания с ориентацией на веер градиентов можно определить как альтернативное обеспечение безопасного перехода при минимальной затрате времени с условием успешного выполнения критерия экономичности.

### Обсуждение (Discussion)

Стандартные алгоритмы обработки навигационной информации базируются на априорных сведениях, которые могут не соответствовать локальной ситуации измерений и прогностическому характеру движения судна. Представляется целесообразным сделать предположение

о гипотетической возможности независимого контроля изолинейного перемещения судна при наличии на борту специальной аппаратуры, способной постоянно фиксировать основные значения параметров навигационной изолинии, подобных «кривизне» и «кручению», а также измерять текущие значения градиентов навигационной функции. Обозначенные навигационные параметры в общепринятом в навигации смысле полностью характеризуют внутреннюю геометрию изолинии плавания судна [12]. В ситуации применения сплайновой изолинии добавляется дополнительный параметр внутренней геометрии аппроксимированной изолинии — *гладкость*, которую в первом приближении следует понимать как *плавность*. При этом мгновенная фиксация градиента приобретает особенно важное практическое значение.

Переход судна по любой траектории фактически выполняется по изолинии, что принципиально согласуется с концепцией конфигурирования комплекса сплайн-градиентов при аппроксимации изолинии кусочным функционалом первой степени. В соответствии с показаниями гирокопического или магнитного компаса, традиционно реализующими условие постоянства истинного курса, маршруты судна по путевым морским картам прокладываются по такой изолинии, как локсодромия, а океанские плавания обычно совершаются по другой изолинии — ортодромии. Роль ортодромии является особенной по сравнению с другими изолиниями по причине наличия неоспоримого преимущества океанского плавания по дуге большого круга для экономии пройденного расстояния и, как следствие, обеспечения финансовой прибыли судоходной компании. В прибрежном плавании, во-первых, необходимо учитывать главенствующую роль курсоуказателя, обеспечивающего ориентацию судна при плавании по локсодромии. Во-вторых, имеет место факт фрагментарной прямолинейности изображения локсодромии как линии пути на карте в меркаторской проекции, что является неоспоримым удобством при коротком морском переходе. В связи с учетом двух указанных обстоятельств локсодромия как линия пути в соотношении с изображением в виде прямой линии на меркаторской проекции представляет самостоятельный математический интерес. Формализованная основа такой процедуры как обсервация также математически реализуется при совместном аналитическом решении уравнений различных навигационных изолиний в рамках общей теории изолиний или графически на основе обобщенного метода линий положения.

Параметрическое представление навигационной изолинии может составить фундаментальную основу при конструировании технического устройства для программированного *изолинейного* плавания судна при условии восстановления профиля характерной изолинии методом сплайн-аппроксимации. Важное практическое свойство следует из кусочного характера сплайна, который приближает к оригиналу навигационную функцию конкретным сегментным полиномом в соответствии с понятием «гладкости» на каждом участке разбиения аргумента. С учетом физической картины представления навигационной функции, отражающей движение судна, сплайн динамически описывает в общей перспективе требуемую траекторию движения любого инерционного объекта.

Целесообразность применения сплайн-аппроксимации навигационных функций обоснована экспертной возможностью быстрого вычисления навигационных параметров и комплекса их оперативных градиентов для установления таких атрибутов изолиний, как функционалы аналитических перегибов, интерпретируемых в математике как характерные точки смены знаков производных, соответствующих в практическом навигационном приложении сигналам автоматической подачи команд судовым органам управления в виде руля и телеграфа. Способствующим этому фактором является то, что при фиксированном градиенте сравнительно просто найти производную функции по любому направлению.

При апробировании данного подхода с использованием соответствующего программного обеспечения бортового компьютера в эргономическом варианте в структуре навигационного автоматизированного комплекса будущего измеряемые параметры изолинии по известным формулам могут быть типовым способом пересчитаны в географические координаты с целью постоянного позиционирования любого подвижного объекта в автономном режиме на специализированных

электронных средствах мониторинга. Графическое представление информации судоводительскому составу наглядно визуализируется за счет построения аппроксимированных изолиний на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа. Задача вероятностного прогнозирования движения судна практически реализуется посредством математической процедуры сплайн-экстраполяции.

В свою очередь, измеренные значения навигационных параметров являются аргументами для вычисления непрерывных значений истинного курса с синхронной передачей команд на авторулевой для обеспечения адаптивного самостоятельного регулируемого плавания при отсутствии принципиальной необходимости использования информации спутниковых данных. Актуальность разработки эффективного метода математического описания данной динамической системы определяет синтез алгоритма адаптивного управления, обеспечивающего организацию движения в пространстве настраиваемых параметров в направлении мгновенного градиента скорости изменения оценочного функционала.

Солнечные бури и всплески магнитных аномалий, а также преднамеренные помехи являются примерами событий, представляющих критическую опасность для спутниковой навигации. В связи с данной проблемой в течение последних пяти лет активно развивается направление создания альтернативных интегрированных навигационных систем, в которых для определения положения и ориентации подвижного объекта используются сторонние данные неинерциальной природы [24], [25]. В качестве практического применения таких сторонних данных предлагается алгоритм высокоточной морской навигации по геофизическим полям с масштабированным восстановлением виртуальных сплайновых карт для эталонного сравнения с фактическими навигационными измерениями [26].

Изолинейную навигацию подвижного объекта можно осуществлять на основе измерений параметров градиента магнитного поля Земли с использованием показаний бортовых магнитных градиентометров с нормированными в единицах индукции магнитометрическими преобразователями [10], [27]. Помимо градиента магнитного поля в навигационных целях может быть использован также гравитационный градиент как математический результат дифференцирования по второй производной гравитационного потенциала. Градиентометр может измерять изменение силы тяжести, что позволяет получать более подробную информацию о навигации и местоположении, чем само явление гравитации.

В большинстве первоначальных экспериментов погрешность определения местоположения с привязкой к гравитационному градиенту составила менее 100 м [28]. Для решения проблемы точности пассивной автономной навигации предложен *метод автоматизированной навигации*, основанный на бесплатформенном гравитационном градиентометре. Результаты использования данного метода показывают, что ошибки ориентации, скорости и позиционирования навигационной системы с гравитационным градиентометром составляют менее 1 угл. мин: 0,1 м/с и 33 м соответственно [29]. Полученные результаты можно признать приемлемыми для стабильной навигации при обязательном условии дальнейшей модернизации алгоритмов обработки информации. В качестве будущих исследований предполагается использовать гибридную навигацию с привязкой к базе данных, основанную на сочетании рельефа местности и гравитационных градиентов. Результаты экспериментов показывают, что точность позиционирования комбинированного алгоритма на отрезке прямой и на криволинейной траектории на 82,4 % и 73,8 % соответственно выше, чем у существующих отдельных алгоритмов [30]. Можно сделать вывод о том, что гибридный алгоритм обладает превосходными характеристиками коррекции местоположения в режиме реального времени.

Компьютерная визуализация программированного движения судна предоставляет возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии мгновенного определения места судна на основе альтернативных методов. Апробированные на методах сплайн-функций алгоритмы могут явиться гармонизированной поддержкой судоводительскому составу при любых обстоятельствах изолинейного плавания в процессе автономной навигации.

## Выводы (Summary)

Проведенное исследование теоретической применимости конфигурирования комплекса сплайн-градиентов при аппроксимации навигационной изолинии кусочным линейным функционалом позволяет сделать следующие выводы:

1. Конвертированы вопросы вычислительной геометрии аппроксимированных навигационных изолиний в практическую плоскость унифицированного использования сплайновых линий положения и сегментным образом интерполированных изолиний в судовождении.
2. Сформулирована новая трактовка понятия о сплайн-градиенте с позиции теории приближения функций.
3. Рассмотрена применимость архитектуры конфигурирования веера оперативных сплайн-градиентов при спрямлении навигационной изолинии сплайном первой степени для стратегического улучшения точностных характеристик обсервации.
4. Обоснована параметризация внутренней геометрии сплайновых изолиний для программированного изолинейного плавания судна в автономном режиме.
5. Дано объяснение возможности практического применения теории сплайн-функций к приближению новейших изолиний навигации будущего.
6. Сопоставимый результат в современных научных публикациях отсутствует.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sumner T. H.* A new and accurate method of finding a ship's position at sea, by projection on Mercator's chart: The principles of the method being fully explained and illustrated by problems, examples, and plates, with rules for practice, and examples from actual observation / T. H. Sumner. — Thomas Groom & Company of Boston, 1843. — 88 p.
2. *Акимов М. А.* Другой приём графического способа определения места на море / М. А. Акимов // Морской сборник. — 1849. — Т. 2. — № 3. — С. 190–198.
3. *Uttmark F. E.* Marc St. Hilary Method for Finding a Ship's Position at Sea / F. E. Uttmark. — New York, 1919. — 37 p.
4. *Жухлин А. М.* Обработка навигационной информации в системах обеспечения безопасности плавания с позиций теории приближения функций: дис. ... д-ра техн. наук / А. М. Жухлин. — Л., 1984. — 325 с.
5. *Дерябин В. В.* Алгоритмизация счисления пути судна на основе нейросетевых технологий: дисс. ... д-ра техн. наук; специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / В. В. Дерябин. — СПб.: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», 2020. — EDN SSFUXD.
6. *Мироненко А. А.* Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук; специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Мироненко. — Новороссийск, 2016. — EDN ZQCRGD.
7. *Makarov A. A.* On Two Algorithms of Wavelet Decomposition for Spaces of Linear Splines / A. A. Makarov // Journal of Mathematical Sciences. — 2018. — Vol. 232. — Is. 6. — Pp. 926–937. DOI: 10.1007/s10958-018-3920-z.
8. *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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.
9. *Karetnikov V. V.* Gradient fill fairway plotting method for mapping inland waterways / V. V. Karetnikov, A. A. Butsanets, A. I. Zaytsev, E. A. Ratner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing. — 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012011.
10. *Гузевич С. Н.* Градиент — основной параметр навигационных измерений / С. Н. Гузевич // Метрология. — 2019. — № 3. — С. 46–55. DOI: 10.32446/0132-4713.2019-3-46-55. — EDN CHTCOM.
11. *Liu Z.* Gradient-Sensitive Optimization for Convolutional Neural Networks / Z. Liu, R. Feng, X. Li, W. Wang, X. Wu // Computational Intelligence and Neuroscience. — 2021. — Vol. 2021. — Is. 1. — Pp. 6671830. DOI: 10.1155/2021/6671830.
12. *Вульфович Б. А.* Основы общей теории навигационных изолиний: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. А. Вульфович. — Л., 1975. — 43 с.

13. Ююкин И. В. Синтез кубическими сплайнами искаженной изолинии в аспекте использования дифференциального режима спутниковой навигации / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358. — EDN JJUGRO.

14. Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934. — EDN QQIVCX.

15. Волков Ю. С. О погрешности приближения простейшей локальной аппроксимацией сплайнами / Ю. С. Волков, В. В. Богданов // Сибирский математический журнал. — 2020. — Т. 61. — № 5. — С. 1001–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503. — EDN RSQEMT.

16. Ююкин И. В. Сплайновая реконструкция эталона информативности в задачах корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253. — EDN OWLOHJ.

17. Veeseer A. Positivity Preserving Gradient Approximation with Linear Finite Elements / A. Veeseer // Computational Methods in Applied Mathematics. — 2019. — Vol. 19. — Is. 2. — Pp. 295–310. DOI: doi:10.1515/cmam-2018-0017.

18. Veeseer A. De Boor–Fix functionals and Hermite boundary conditions in the polynomial spline interpolation problem / A. Veeseer // Computational Methods in Applied Mathematics. — 2019. — Vol. 19. — Is. 2. — Pp. 295–310. DOI: 10.1007/s40879-020-00406-z.

19. Гузевич С. Н. Природная система пространственного счисления / С. Н. Гузевич // Навигация и гидрография. — 2024. — № 74. — С. 40–55. — EDN DJHGWP.

20. Guzevich, S. N. Conditions for reliable measurements in space / S. N. Guzevich // German international journal of modern science. — 2021. — № 19–1. — С. 14–21. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-19-1-14-22. — EDN DHRMPX.

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

22. Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274. — EDN BQRXTR.

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

24. Peshekhonov V. G. High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data / V. G. Peshekhonov // Gyroscopy and Navigation. — 2022. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–6.

25. Stepanov O. A. Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory / O. A. Stepanov, Y. A. Litvinenko, V. A. Vasil'ev, A. M. Isaev // 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS) 2023. — С. 1–6. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.

26. Yuyukin I. V. Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // AIP Conference Proceedings. — 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.

27. Volkovitskii A. K. Application of Magnetic Gradiometers to Control Magnetic Field of a Moving Object / A. K. Volkovitskii, E. V. Karshakov, M. Y. Tkhorenko, B. V. Pavlov // Automation and Remote Control. — 2020. — Vol. 81. — Is. 2. — Pp. 333–339.

28. Lee J. Performance Evaluation and Requirements Assessment for Gravity Gradient Referenced Navigation / J. Lee, J. H. Kwon, Yu Myeongjong // Sensors. — 2015. — Vol. 15. — Is. 7. — Pp. 16833–16847. DOI: 10.3390/s150716833.

29. Gao D. An Aided Navigation Method Based on Strapdown Gravity Gradiometer / D. Gao, B. Hu, L. Chang, F. Qin, X. Lyu // Sensors. — 2021. — Vol. 21. — Is. 3. DOI: 10.3390/s21030829.

30. Li T. Genetic Algorithm-Based Weighted Comprehensive Image Matching Algorithm for Underwater Gravity Gradient-Aided Navigation / T. Li, B. Wang, Z. Deng, M. Fu // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — 2024. — Vol. 49. — Is. 4. — Pp. 1647–1656. DOI: 10.1109/JOE.2024.3379484.

## REFERENCES

1. Sumner, Thomas Hubbard. A new and accurate method of finding a ship's position at sea, by projection on Mercator's chart: The principles of the method being fully explained and illustrated by problems, examples, and plates, with rules for practice, and examples from actual observation. Thomas Groom & Company of Boston, 1843.
2. Akimov, Mikhail A. "Drugoy priyem graficheskogo sposoba opredeleniya mesta na more." *Morskoy sbornik* 2.3 (1849): 190–198.
3. Uttmark, Fritz E. *Marc St. Hilary Method for Finding a Ship's Position at Sea*. New York, 1919.
4. Zhukhlin, Alexey M. Obrabotka navigatsionnoi informatsii v sistemakh obespecheniya bezopasnosti plavaniya s pozitsii teorii priblizheniya funktsii. Dr. Diss. L., 1984.
5. Deryabin, V. V. Algoritmizatsiya schisleniya puti sudna na osnove neyrosetevykh tekhnologiy. Grand PhD diss. Saint-Petersburg, 2020.
6. Mironenko, A. A. Metodologiya formalizatsii navigatsionnoy obstanovki, planirovaniya marshruta i programmnykh traektoriy dvizheniya sudna. Grand PhD diss. Novorossiysk, 2016.
7. Makarov, A.A. "On Two Algorithms of Wavelet Decomposition for Spaces of Linear Splines." *Journal of Mathematical Sciences* 232.6 (2018): 926–937. DOI: 10.1007/s10958–018–3920-z.
8. Yuyukin, I. V. "Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of nogo areas in due time." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.
9. Karetnikov, V.V., A. A. Butsanets, A. I. Zaytsev, and E. A. Ratner. "Gradient fill fairway plotting method for mapping inland waterways." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 867.1 (2021): 012011. DOI: 10.1088/1755–1315/867/1/012011.
10. Guzevich, S.N. "Gradient is the main parameter navigation measurements." *Metrologiya* 3 (2019): 46–55. DOI: 10.32446/0132-4713.2019-3-46-55.
11. Liu, Z., X. Wu, et al. "Gradient-Sensitive Optimization for Convolutional Neural Networks." *Computational Intelligence and Neuroscience* 2021.1 (2021): 6671830. DOI: 10.1155/2021/6671830.
12. Vulfovich, Boris A. Osnovy obshey teorii navigatsionnykh izolinii. Abstract of Dr. Diss. L., 1975.
13. Yuyukin, I. V. "Cubic splines synthesis of a distorted isoline in the aspect of using differential mode of satellite navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.
14. 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.
15. Volkov, Yu.S. and V. V. Bogdanov. "On error estimates of local approximation by splines." *Siberian Mathematical Journal* 61.5 (2020): 1001–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503.
16. Yuyukin, I. V. "Spline reconstruction of the informativeness template in correlation-extreme navigation tasks." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253.
17. Veesser, A. "Positivity Preserving Gradient Approximation with Linear Finite Elements." *Computational Methods in Applied Mathematics* 19.2 (2019): 295–310. DOI: doi:10.1515/cmam-2018–0017.
18. Veesser, A. "De Boor–Fix functionals and Hermite boundary conditions in the polynomial spline interpolation problem." *Computational Methods in Applied Mathematics* 19.2 (2019): 295–310. DOI: 10.1007/s40879-020-00406-z.
19. Guzevich, S.N. "The natural spatial number system." *Navigation And Hydrography* 74 (2024): 40–55.
20. Guzevich, S.N. "Conditions for reliable measurements in space." *German International Journal Of Modern Science* 19–1 (2021): 14–21. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-19-1-14-22.
21. 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.
22. Yuyukin, I.V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
23. Vas'kov, A.S. and A. A. Mironenko. "Method for solving the isostage equations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 212–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-212-223.

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

25. Stepanov, O. A., Yu. A. Litvinenko, V. A. Vasil’ev and A. M. Isaev. “Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory.” *2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)2023*: 1–6. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.

26. Yuyukin, I. V. “Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation.” *AIP Conference Proceedings* 2476.1 (2023): 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.

27. Volkovitskii, A. K., E. V. Karshakov, M. Y. Tkhorenko and B. V. Pavlov. “Application of Magnetic Gradiometers to Control Magnetic Field of a Moving Object.” *Automation and Remote Control* 81.2 (2020): 333–339.

28. Lee, J., J. H. Kwon and Yu. Myeongjong. “Performance Evaluation and Requirements Assessment for Gravity Gradient Referenced Navigation.” *Sensors* 15.7 (2015): 16833–16847. DOI: 10.3390/s150716833.

29. Gao, D., X. Lyu, et al. “An Aided Navigation Method Based on Strapdown Gravity Gradiometer.” *Sensors* 21.3 (2021). DOI: 10.3390/s21030829.

30. Li, T., B. Wang, Z. Deng and M. Fu. “Genetic Algorithm-Based Weighted Comprehensive Image Matching Algorithm for Underwater Gravity Gradient-Aided Navigation.” *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 49.4 (2024): 1647–1656. DOI: 10.1109/JOE.2024.3379484.

#### 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](mailto:uukiniv@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 27 марта 2025 г.*

*Received: Mar. 27, 2025.*

## METHOD OF CREATING CONTINUOUS SHIPLOADER MACHINE BASED ON PORTAL CRANE

**A. V. Chihachev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> LENMORNIIPROEKT, JSC, St. Petersburg, Russian Federation.

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

*A method for creating a continuous shiploader machine is proposed, involving the attachment of a telescopic conveyor boom to the supporting structure of a portal crane and the use of its mechanisms to control all movements of the boom. The article pays particular attention to the issue of dust emissions from bulk cargoes in existing ports of the Russian Federation, which continue to use clamshell grab cranes for transshipment. It is noted that the currently implemented comprehensive anti-dust measures do not eliminate spillage and dust loss of bulk cargo during loading and unloading operations with grab cranes at the berth. At present, the only effective solution is the introduction of costly shiploaders, which acts as a deterrent to development for many Russian ports due to the unprofitability of such investments. To improve the environmental performance and efficiency of bulk cargo transshipment at the berths of existing ports, the task was set to develop a more affordable method for transitioning from clamshell grab cranes to modern continuous-operation shiploaders. As part of the research, a special attachment for a telescopic conveyor boom to the portal crane was developed. The general view of the machine is presented, along with images of articulated and stationary fastenings to portal cranes of various designs. The principles of operation of the portal crane mechanisms are considered both in conjunction with the telescopic boom when shipping bulk cargoes and when the crane operates independently with its own hook grip for handling general cargo. A comparative analysis of the main technical characteristics and cost indicators of the developed shiploader is performed. Its main advantages and disadvantages are identified. The proposed method for creating a shiploader based on a portal crane demonstrates the possibility of constructing a new type of cargo handling equipment that combines high productivity and environmental performance, versatility of application, ease of implementation in existing ports, as well as low manufacturing and installation costs.*

*Keywords: continuous machine, mobile shiploader, marine cargo front, seaport, portal crane, dust pollution, shiploader, bulk cargo, telescopic conveyor, cargo handling.*

**For citation:**

Chihachev, Aleksandr V. "Method of creating continuous shiploader machine based on portal crane." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 384–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-384-395.

**УДК: 627.352.2**

## СПОСОБ СОЗДАНИЯ СУДОПОГРУЗОЧНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА БАЗЕ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

**А. В. Чихачев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

*Рассмотрен способ создания судопогрузочной машины непрерывного действия путем закрепления конвейерной телескопической стрелы на опорно-ходовой конструкции порталного крана и применения его механизмов для управления всеми перемещениями стрелы. Особое внимание уделено проблеме пыления сыпучих грузов в существующих портах Российской Федерации, продолжающих задействовать грейферные порталные краны для перевалки грузов. Отмечается, что применяемые в настоящее время комплексные меры борьбы с пылением не позволяют устранить просыпь и пылеунос сыпучих грузов при проведении погрузочно-разгрузочных работ грейфером на причале. При этом единственным эффективным решением является внедрение дорогостоящих судопогрузочных машин, что служит сдерживающим фактором*

развития для многих портов России ввиду нерентабельности инвестиций. В целях повышения экологичности и интенсивности перевалки сыпучих грузов на причалах действующих портов сформулирована задача по разработке более доступного способа перехода от грейферных порталных кранов к современным судопогрузочным машинам непрерывного действия. В рамках исследования разработано специальное крепление телескопической конвейерной стрелы к порталу порталного крана. Представлены общий вид машины, а также изображения шарнирного и стационарного креплений к порталам кранов различной конструкции. Рассмотрены принципы действия механизмов порталного крана как в сочленении с телескопической стрелой при отгрузке сыпучих грузов, так и при обособленной работе крана собственным крюковым захватом с тарно-штучными грузами. Выполнен сравнительный анализ основных технических характеристик и стоимостных показателей разработанной судопогрузочной машины. Определены ее основные достоинства и недостатки. Предложенный способ создания судопогрузочной машины на базе порталного крана демонстрирует возможность устройства нового типа подъемно-транспортной машины, сочетающего высокую производительность и экологичность, универсальность применения, доступность внедрения в существующих портах, а также низкую стоимость изготовления и монтажа.

*Ключевые слова:* машина непрерывного транспорта, мобильная судопогрузочная машина, морской грузовой фронт, морской порт, порталный кран, пылевое загрязнение, судопогрузочная машина, сыпучий груз, телескопический конвейер, погрузочно-разгрузочные работы.

**Для цитирования:**

Чихачев А. В. Способ создания судопогрузочной машины непрерывного действия на базе порталного крана / А. В. Чихачев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 384–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-384-395. — EDN HMPUBS.

### **Введение (Introduction)**

Россия является одним из крупнейших мировых экспортеров сыпучих грузов, поэтому задачей государства является сохранение наблюдающейся динамики их перевалки для укрепления и дальнейшего повышения своей позиции в мировой экономике. Перспектива увеличения объемов экспорта сыпучих грузов предусматривает реализацию намеченной стратегии развития морской транспортной инфраструктуры РФ<sup>1</sup>, разработанной с учетом текущих рыночных условий и объективно меняющихся тенденций развития мировой портовой инфраструктуры, которыми в настоящее время являются внедрение передовых технологических процессов перегрузки грузов в портах, в том числе экологически безопасных («зеленых») технологий [1], а также стремление к увеличению объемов судовых партий и интенсивности погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) [2]. Вместе с тем основная доля сыпучих грузов в морских портах перегружается навалом, и следовательно, дальнейшее увеличение объемов перевалки приведет к ухудшению экологической обстановки в морских портах России. Мелкие частицы в фрикционном составе сыпучих грузов вызывают пыление в результате воздействия на них технологического оборудования при выполнении погрузочно-разгрузочных работ и ветрового воздействия при открытом хранении, что приводит к безвозвратным потерям груза, отрицательному воздействию на людей и загрязнению окружающей среды: атмосферного воздуха, почвы и акватории порта [3].

Несмотря на существование значительного количества зарубежных морских портов, переваливающих пылящие навалочные грузы в непосредственной близости от населенных пунктов, в России данной проблеме уделяется гораздо большее внимание, чем за рубежом [4]. Это связано с широким применением грейферных порталных кранов на причалах отечественных портов (универсальная технология перевалки), что отличает их от зарубежных, где преимущественно используются судопогрузочные и судоразгрузочные машины непрерывного действия<sup>2</sup>. Согласно данным 2019 г., в РФ существует более 32 экспортных угольных терминала, из них грейферную технологию

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г.» // Собрание законодательства РФ. 13.12.2021 г. № 50 (ч. IV). Ст. 8613.

<sup>2</sup> Возможно ли решить проблему пыления при открытой перевалке угля? // Машиностроительный завод «Поток». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://мзпоток.рф/company/articles/vozmozhno-li-reshit-problemu-pyleniya-pri-otkrytoy-perevalke-uglya/> (дата обращения: 12.03.2025).

продолжают использовать 23 порта (72 % от общего числа), современную конвейерную технологию применяют пять терминалов (15,5 % от общего числа), комбинированную технологию используют четыре терминала (12,5 % от общего числа) [5].

Выполняемые грейфером операции с сыпучими грузами являются мощным неорганизованным источником пыления на всех грузовых фронтах порта, поэтому в настоящее время данная технология считается наиболее «грязной» [6]. Согласно актуальному справочнику наилучших доступных технологий (см. ИТС 46–2019 «Сокращение выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ при хранении и складировании товаров (грузов)») [7], проблемы пыления и пылеуноса при применении грейферной технологии перевалки в настоящее время могут быть отчасти решены только комплексным применением ряда проверенных методов, среди которых устройство ветропылезащитных экранов и высаживание защитных лесных насаждений, использование водяных пушек орошения и туманообразования, механическая и вакуумная уборка, проведение специальных организационно-технических мероприятий [8]. Вместе с тем, несмотря на существующее разнообразие решений, комплексный подход не позволяет устранить проблемы просыпи и пылеуноса груза на морском грузовом фронте (МГФ), возникающие вследствие переноса заполненного грейфера с прикормонного склада в трюм судна.

Проблема пыления на причалах существующих портов сегодня может быть решена исключительно только переходом от крановой механизации (машин циклического действия) к современным судопогрузочным машинам непрерывного действия, которые наиболее распространены на зарубежных терминалах [9]. Необходимо привлечение больших объемов инвестиций в развитие порта, которые, как правило, могут быть оправданы только при строительстве новых крупных специализированных терминалов или при существенном увеличении грузооборота существующего порта. Это является основной причиной сдерживания существующих портов от проведения мероприятий по внедрению машин непрерывного транспорта в свои технологические процессы.

Целью данного исследования является разработка более доступного способа перехода от открытой грейферной технологии перевалки к закрытой конвейерной, сочетающего доступность и универсальность применения, позволяющего повысить экологичность и интенсивность обработки судов на МГФ.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время 75 % всего объема сухогрузов, переваливаемых в морских портах Российской Федерации, занимают сыпучие грузы. Согласно статистическим данным Ассоциации морских торговых портов (АСОП)<sup>3</sup>, наиболее востребованными на сегодняшний день сыпучими грузами являются каменный уголь, кокс, минеральные удобрения и зерно (рис. 1).



Рис. 1. Ежегодная динамика объемов перевалки наиболее востребованных сыпучих грузов, млн т / год

<sup>3</sup> Ассоциация морских торговых портов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.morport.com/rus/content/statistika-0> (дата обращения: 26.02.2025).

Ежегодные объемы перевалки угля и кокса продолжают сохраняться на высоком уровне и составляют 188,1 млн т за прошедший 2024 г. Наряду с этим в период 2021–2024 гг. наблюдался существенный прирост объемов перевалки зерна с 42,4 млн т до 74,8 млн т (+76 %) и минеральных удобрений с 19,3 млн т до 42,5 млн т (+120 %).

Решить проблему пыления сыпучих грузов на причалах предлагается за счет разработки новой судопогрузочной машины (СПМ), где в качестве основного рабочего органа применяется двухсекционная телескопическая стрела мобильного конвейера, оборудованная системой ленточных конвейеров, а опорно-ходовой частью стрелы служит портал порталного крана, механизмы которого задействованы в роли основных механизмов стрелы для управления всеми ее перемещениями в координатной плоскости трюма судна. Выбор стрелы мобильного телескопического конвейера (рис. 2) в качестве основного рабочего органа в предлагаемой конструкции СПМ обуславливается тем, что данные машины на сегодняшний день широко распространены и имеются в наличии во многих существующих морских и речных портах, где применяются порталные краны на МГФ.

Примерами являются АО «Мурманский морской торговый порт», ООО «Универсальный перегрузочный комплекс» (порт Усть-Луга), ООО «Порт Логистик» (порт Выборг), ООО «Порт Высокский», ООО «Угольный терминал “Порт Вера”», ООО «Стивидорная компания “Малый порт”» (порт Восточный), ОАО «Ейский морской порт», ООО «Транс карго» / ООО «Евротэк-Универсал» (порт Кавказ) и др. Представленные машины в портах применяются для каскадной передачи груза по территории порта при формировании открытых штабелей сыпучих грузов, а также в качестве судопогрузочных машин на причале [10]. Наличие мобильных телескопических конвейеров в составе оборудования существующего порта позволит наиболее оперативно выполнять модернизацию существующих порталных кранов на МГФ с минимальными затратами на изготовление специального крепления к portalу крана.



Рис. 2. Типовая конструкция мобильного телескопического конвейера  
(Superior industries, inc. [Электронный ресурс]. —  
Режим доступа: [https://superior-ind.com/superior-industries/  
telestacker-conveyor-front-qtr-view-1200-by-superior-industries/](https://superior-ind.com/superior-industries/telestacker-conveyor-front-qtr-view-1200-by-superior-industries/))

Таким образом, использование стрелы мобильного телескопического конвейера в предлагаемой конструкции СПМ позволит получить все имеющиеся преимущества данной машины, среди которых экологичность, высокая производительность, относительно низкая себестоимость и малые сроки изготовления.

*Обзор разработанной конструкции СПМ.* Судопогрузочная машина (рис. 3) включает наклонную телескопическую стрелу, состоящую из неподвижной 1 и подвижной секций 2. Каждая секция стрелы выполняется из пространственной стержневой конструкции, оборудуется ленточным конвейером 3 и укрывается жестким кожухом 4 на неподвижной секции и гибким кожухом 5 на подвижной для сохранности груза от атмосферных осадков и ветра, исключая загрязнения окружающей среды от ветрового выноса сыпучего материала с конвейерной ленты.

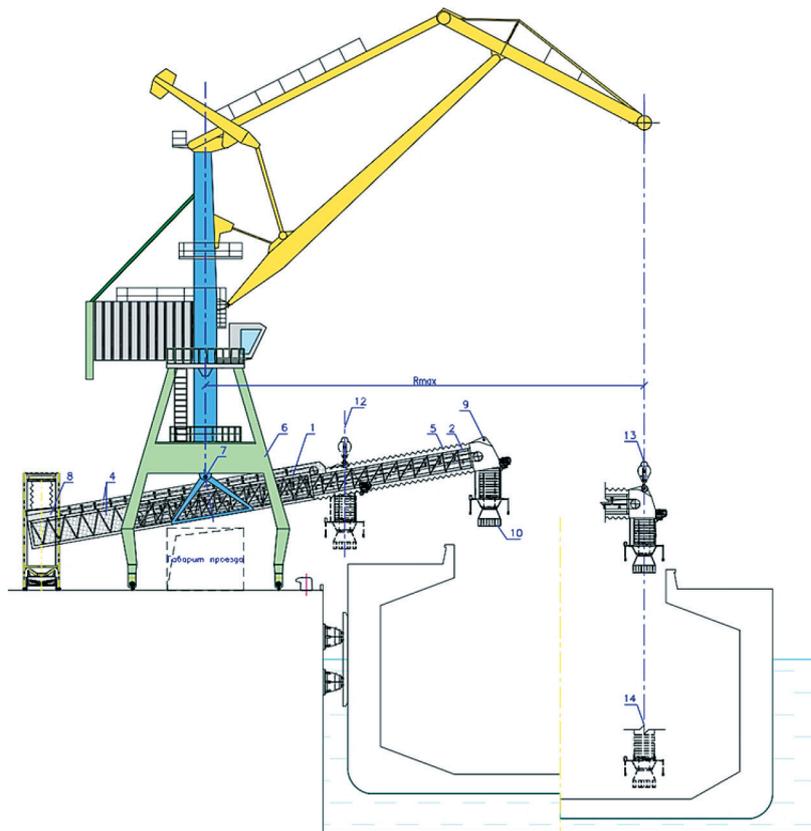


Рис. 3. Судопогрузочная машина на базе портального крана (общий вид)

Неподвижная секция стрелы закрепляется на портале портального крана *б* при помощи шарниров *7* и оборудуется приемным бункером *8*, а также специальными роликовыми направляющими для перемещения подвижной секции внутри ее конструкции (рис. 4).

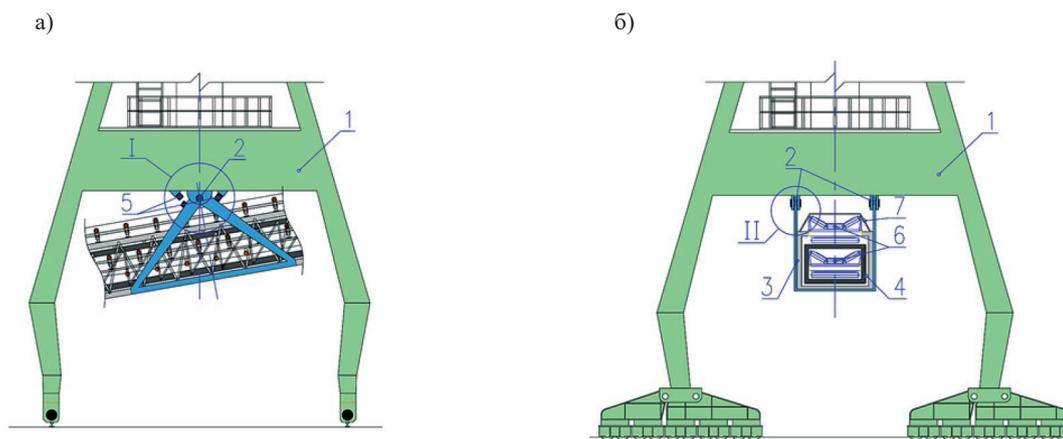


Рис. 4. Конструкция шарнирного крепления неподвижной секции к portalу:  
*а* — вид сбоку; *б* — вид спереди

В зависимости от конструкции портала крана неподвижная секция стрелы также может быть закреплена стационарно (рис. 5). Подвижная секция в свою очередь оснащается креплением под крюковую захват *9* портального крана, осуществляющего ее выдвигание при помощи своего механизма изменения вылета стрелы. Концевая часть секции оборудуется телескопическим загрузочным устройством *10* для уменьшения высоты и скорости падения сыпучего материала в трюм судна, снижая пылеобразование в процессе его погрузки.

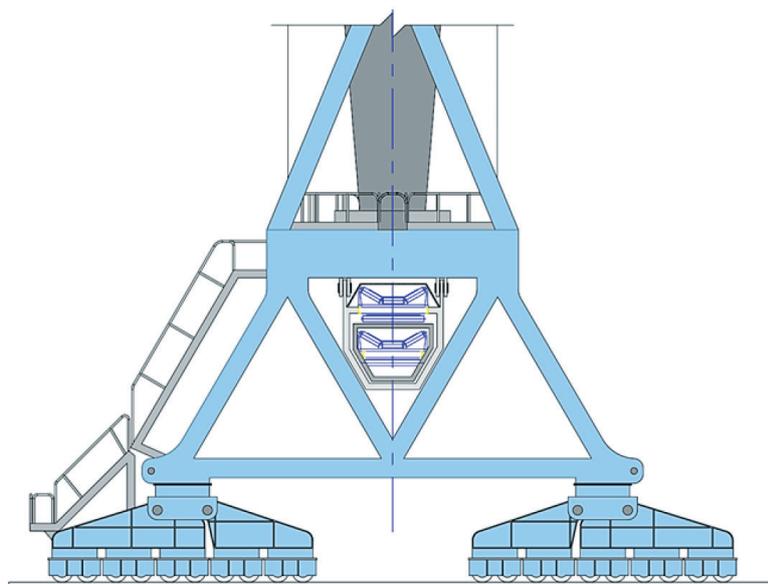


Рис. 5. Способ стационарного закрепления стрелы к порталу крана

Фиксация наклона стрелы в крайних положениях выполняется специальными резиновыми демпферами 11, установленными в нижней части портала и ответной части на самом шарнире (рис. 6). Наличие демпферов также требуется для установки стрелы судопогрузочной машины в стояночное положение 12 на период выполнения порталным краном обособленных работ, например, по перегрузке тарно-штучных видов грузов при помощи крюкового захвата.



Рис. 6. Конструкция шарнирного узла:  
 а — вид сбоку; б — вид спереди

Максимальные вылет телескопической стрелы 13 соответствует вылету порталного крана, обеспечивая загрузку трюма судна при различных уровнях воды за счет опускания загрузочного устройства на дно трюма 14.

*Принцип действия разработанной СПМ.* В ожидании начала погрузочных работ телескопическая стрела машины находится в стояночном положении, обеспечивая безопасный подход судов и их швартовку к причалу. Наклон устройства в стояночном положении достигается исключительно собственным весом его конструктивных элементов: опираясь на демпферы, стрела закрепляется под углом, не требуя постоянного ее удержания крюковым захватом порталного крана. Таким образом, порталный кран может обособленно выполнять операции с другими видами грузов в периоды ожидания погрузочных работ по сыпучим грузам.

Перед выполнением погрузочных работ с сыпучими грузами крюк порталного крана прикрепляется к специально оборудованному захвату на подвижной секции стрелы, ось которого в стояночном положении соответствует минимальному вылету порталного крана. Увеличивая вылет стрелы, порталный кран выдвигает подвижную секцию стрелы и, как следствие, отдаляет

ее центр тяжести от оси вращения, заставляя стрелу свободно поворачиваться по часовой стрелке до крайнего положения ограничительного положения демпфера. Возврат стрелы в исходное (стояночное) положение выполняется аналогичным образом в обратном порядке, при этом стрела поворачивается против часовой стрелки. Расстояние перемещения подвижной секции стрелы зависит от ширины люкового отверстия трюма судна и ограничивается максимальным вылетом порталного крана. Таким образом, перемещение неподвижной стрелы вместе с порталом крана по длине судна и выдвигание телескопической стрелы по ширине судна при помощи стрелы крана обеспечивают равномерную послойную загрузку сыпучего груза в трюмы.

В процессе погрузочных работ сыпучий груз с других грузовых фронтов терминала может подаваться в приемный бункер стрелы при помощи прикордонного ленточного конвейера с передвижным ленточно-петлевым перегружателем, а также грейферами, мобильными передвижными конвейерами, стакерами и другим погрузочным оборудованием, способным переваливать груз на высоте расположения бункера стрелы СПМ. Далее из приемного бункера сыпучий груз передается на ленточный конвейер неподвижной секции стрелы, затем пересыпается на конвейер подвижной секции стрелы и попадает в телескопическое загрузочное устройство, по которому сыпается в трюм судна. Глубина опускания телескопического загрузочного устройства регулируется относительно текущего положения дна трюма с учетом откачки балластных вод в период ПРР, обеспечивая минимальную высоту открытого падения груза в трюм для снижения интенсивности пыления.

*Технические характеристики разработанной СПМ.* Согласно техническим характеристикам машины-аналога, производимой на одном из заводов мобильных телескопических конвейеров и мобильных судопогрузочных машин<sup>4</sup>, новая судопогрузочная машина может иметь параметры, указанные в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные технические характеристики машины-аналога

Наименование параметра	Значение
Производительность	200–2000 т/ч
Ширина конвейерной ленты	650–1400 мм
Угол наклона	До 18 град
Длина стационарной части	8–40 м
Вылет стрелы	5–15 м
Скорость выдвигания стрелы	0,1–0,8 м/с
Скорость передвижения машины	0,05–0,2 м/с
Вес стрелы	5–15 т
Скорость ветра (рабочие операции)	До 15 м/с
Температурный диапазон	От –45 до +45

*Примечание.* В случае использования предлагаемой судопогрузочной машины скорости выдвигания и передвижения телескопической стрелы будут определяться параметрами приводов порталного крана, на базе которого будет устроена судопогрузочная машина.

Помимо этого опыт применения машин-аналогов в отечественных портах показывает, что применение подобных машин позволяет достигнуть производительности до 3500 т/ч. Сравнение показателей производительности новой машины с другими типами судопогрузочных машины представлено в табл. 2.

<sup>4</sup> Товарищество с ограниченной ответственностью «НПО КонвейерМашСервис». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://npo-kms.kz/products/21-sudopogruzochnaja-mashina-malaja-povorotnaja-peredvizhnaja.html> (дата обращения: 15.03.2025).

**Показатели производительности машин для погрузки сыпучих грузов**

Тип судопогрузчика	Производительность в т/ч
1. Портальный кран	≈ 650
2. Мобильный телескопический конвейер	≈ 1000
3. Судопогрузочная машина на базе существующего портального крана и стрелы мобильного телескопического конвейера	От 1000
4. Новая мобильная СПМ	До 3500
5. Судопогрузочная машина на базе существующего портального крана и телескопической стрелы мобильной СПМ	от 1000 до 1500
6. Новый портальный кран	≈ 1000
7. Новая судопогрузочная машина на базе нового портального крана и новой телескопической стрелы мобильной СПМ	до 3500
8. Новая координатная судопогрузочная машина	до 4500

*Примечание.* Следует учитывать, что с увеличением производительности возрастает вес металлоконструкции устанавливаемой стрелы вследствие необходимости увеличения ширины ленты, установки более мощных приводов конвейеров, достижения более высоких скоростей ленты и, соответственно, увеличения динамических нагрузок на металлоконструкцию портала.

Выполненный анализ показывает, что новая судопогрузочная машина по производительности более чем в 1,5 раза превосходит портальные краны, а также может конкурировать с высокопроизводительными мобильными и координатными СПМ. Вместе с тем для определения оптимальной производительности машины непрерывного действия, позволяющей оптимизировать затраты на усиление конструкции портала крана, предстоит выполнить ряд расчетов несущей способности существующих конструкций, элементов и узлов для всех известных на сегодняшний день типов конструкций порталов, что позволит в дальнейшем создать необходимую материально-техническую базу для обеспечения массового производства креплений к портальным кранам. Это сделает технический переход от портальных кранов циклического действия к судопогрузочной машине непрерывного действия еще более доступным.

*Стоимостная оценка разработанной СПМ.* Исключение собственной металлоконструкции опорно-ходового устройства мобильного телескопического конвейера и мобильной судопогрузочной машины сокращает металлоемкость новой судопогрузочной машины на 30–35 %. Таким образом, учитывая необходимость изготовления и монтажа специального крепления телескопической стрелы к portalу крана, суммарная стоимость оборудования портального крана новой телескопической стрелой (машиной непрерывного действия) составит не более 80 % от полной стоимости данной машины.

В зависимости от поставленных задач, новая судопогрузочная машина может иметь следующие варианты исполнения:

- 1) на базе имеющихся в порту портального крана и мобильного телескопического конвейера с демонтированным опорно-ходовым устройством;
- 2) на базе имеющегося в порту портального крана и приобретенной новой телескопической стрелы мобильного телескопического конвейера;
- 3) на базе имеющегося в порту портального крана и приобретенной новой телескопической стрелы мобильной СПМ (аналог мобильного телескопического конвейера с большей производительностью);
- 4) в полностью заводском исполнении на базе нового портального крана и новой телескопической стрелы мобильной СПМ.

Сравнение стоимостных показателей судопогрузочных машин в различных вариациях их применения на причале выполнено в табл. 3.

Таблица 3

**Затраты на оборудование МГФ машинами непрерывного действия**

Применяемое технологическое оборудование	Потребность в дополнительных работах	Общая стоимость, млн руб. (с НДС)
<i>Модернизация существующего терминала с порталными кранами</i>		
1. Портальный кран (базовый вариант)	–	0
2. Мобильный телескопический конвейер ( $Q \approx 1000$ т/ч, $L = 45$ м)	Доставка машины на объект. Пусконаладочные работы	Около 45,0
3. Судопогрузочная машина на базе существующего порталного крана ( $R_{\max} = 31,5$ м) и стрелы мобильного телескопического конвейера ( $Q \approx 1000$ т/ч, $L = 45$ м)	Изготовление крепления стрелы к металлоконструкции портала. Монтаж конвейера к portalу. Пусконаладочные работы	$\approx 15\%$ от стоимости мобильного конвейера
<i>Итого:</i>		$\approx 6,75$
4. Судопогрузочная машина на базе существующего порталного крана ( $R_{\max} = 31,5$ м) и новой стрелы мобильного телескопического конвейера ( $Q \approx 1000$ т/ч, $L = 45$ м)	Изготовление крепления стрелы к металлоконструкции портала. Монтаж стрелы к portalу крана	$\approx 15\%$ стоимости мобильного конвейера
	Покупка новой телескопической стрелы. Доставка стрелы на объект. Пусконаладочные работы	$\approx 65\%$ от стоимости нового мобильного конвейера
<i>Итого:</i>		$\approx 36,0$
5. Новая мобильная СПМ (аналог мобильного телескопического конвейера с большей производительностью)	Возможное усиление конструкции существующего причала. Доставка новой СПМ на объект. Монтаж новой СПМ на причале. Пусконаладочные работы	Около 153,5
6. Судопогрузочная машина на базе существующего порталного крана и новой телескопической стрелы мобильной СПМ	Изготовление крепления стрелы к металлоконструкции портала. Монтаж стрелы к portalу крана. Возможное усиление металлоконструкции портала	$\approx 15\%$ от стоимости новой мобильной СПМ
	Покупка новой телескопической стрелы. Доставка стрелы на объект. Пусконаладочные работы	$\approx 65\%$ от стоимости новой мобильной СПМ
<i>Итого:</i>		$\approx 115,0$
7. Новая координатная судопогрузочная машина	Демонтаж существующих порталных кранов. Усиление конструкции существующего причала. Доставка новой СПМ на объект. Монтаж новой СПМ на причале. Пусконаладочные работы	Около 710,0

Таблица 3  
 (Окончание)

<i>Строительство нового терминала по перевалке сыпучих грузов</i>		
1. Новый порталный кран	Доставка машины на объект. Монтаж машины на причале. Пуско-наладочные работы	Около 550,0
2. Новая мобильная СПМ (аналог мобильного телескопического конвейера с большей производительностью)	Доставка машины на объект. Монтаж машины на причале. Пусконаладочные работы	Около 153,5
3. Новая судопогрузочная машина на базе нового порталного крана и новой телескопической стрелы мобильной СПМ	Доставка новой СПМ на объект. Монтаж новой СПМ на причале. Пусконаладочные работы	Около 550,0
		≈ 70 % от стоимости новой мобильной СПМ
<i>Итого:</i>		≈ 655,0
4. Новая координатная судопогрузочная машина	Доставка машины на объект. Монтаж машины на причале. Пусконаладочные работы	Около 710,0

Выполненный анализ показал, что в настоящее время создание предложенной судопогрузочной машины является наиболее доступным способом перехода от грейферных порталных кранов (машин циклического действия) к современным машинам непрерывного действия, ввиду следующих причин:

Реализация данного технического решения в существующих портах потребует меньших вложений средств по сравнению с приобретением новых судопогрузочных машин.

Заводское исполнение предложенной судопогрузочной машины на базе нового порталного крана и телескопической стрелы также будет иметь меньшую стоимость в сравнении с новой координатной судопогрузочной машиной, при этом не будет существенно уступать ей в производительности.

Вместе с тем наибольший экономический эффект применения предлагаемой судопогрузочной машины в заводском исполнении может быть достигнут в портах с экспортно-импортным грузопотоком. В этом случае возможность данной машины осуществлять попеременную работу по погрузке и разгрузке судов позволит сократить затраты вдвое за счет отсутствия необходимости одновременного приобретения судопогрузочной и судоразгрузочной машин в независимом исполнении.

### **Заключение (Conclusion)**

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что предложенный способ создания новой судопогрузочной машины на базе порталного крана позволяет получить следующие основные преимущества.

1. Повысить экологичность погрузки судов порталными кранами на причале путем применения машины непрерывного действия с телескопическим разгрузочным устройством, снижающим скорость падения материала в трюм, а также за счет отказа от применения грейферов при перевалке сыпучих грузов.

2. Сохранить универсальность порта за счет создания нового типа унифицированной машины, одновременно сочетающую в себе возможности судопогрузочной и судоразгрузочной машин с возможностью обработки, как упакованных в тару, так и переваливаемых навалом грузов.

3. Увеличить интенсивность погрузки грузовых судов порталными кранами более чем в 1,5 раза за счет их переоборудования в высокопроизводительные судопогрузочные машины непрерывного действия.

4. Повысить доступность внедрения машин непрерывного действия на МГФ существующих портов с применением стрелы мобильного телескопического конвейера для переоборудования порталного крана, сократив стоимость подобных машин в 3 раза по сравнению со стоимостью приобретения новой мобильной СПМ и в 18 раз по сравнению с координатной СПМ.

5. Сократить стоимость внедрения машин непрерывного действия на МГФ существующих портов с применением стрелы мобильной СПМ в 1,2 раза по сравнению с покупкой мобильной СПМ и в 5 раз по сравнению с координатной СПМ.

6. Оптимизировать процессы доставки и монтажа за счет возможности транспортировки телескопической стрелы в порт автотранспортом в контейнере, а также возможности сборки предлагаемой конструкции при помощи имеющихся в порту порталных кранов без привлечения дополнительных грузоподъемных машин, например, автокранов.

7. Применять модернизированный порталный кран на выносных «узких» пирсах, что ранее было невозможным ввиду работы грейфером через прикордонный склад, а также для формирования штабелей сыпучих грузов при использовании транспортно-конвейерной системы на терминале.

Основным недостатком предлагаемого технического решения является высота установки стрелы над уровнем причала. В некоторых случаях это может создавать трудности при загрузке судов с большой высотой надводного борта. Следовательно, наихудшим техническим условием работы данной судопогрузочной машины является период высокого уровня воды в совокупности с относительно невысокой проектной отметкой кордона причала. Вместе с тем указанный недостаток нивелируется возможностью подхода судов к причалу в балласте независимо от уровня моря в момент швартовки судна.

Учитывая наличие данного недостатка, применение машины будет наиболее оправдано в портах с высокой отметкой кордона (например, расположенных на приливных морях), а также портах, отгружающих сыпучие грузы в небольшие суда и баржи для последующей транспортировки грузов в условиях малого каботажа или перегрузки на рейде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Philipp R. Towards Green and Smart Seaports: Renewable Energy and Automation Technologies for Bulk Cargo Loading Operations / R. Philipp, G. Prause, E. O. Olaniyi, F. Lemke // Environmental and Climate Technologies. — 2021. — Vol. 25. — Is. 1. — Pp. 650–665. DOI: 10.2478/rtuct-2021-0049. — EDN ZMPOYD.

2. Мурадова З. П. Анализ тенденций и особенностей развития морских портов в Российской Федерации / З. П. Мурадова, А. Б. Абакарова // Вестник университета. — 2021. — № 8. — С. 74–80. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-8-74-80. — EDN NTALEI.

3. Майорова Л. П. Моделирование распространения взвеси угольной пыли при хранении и погрузочно-разгрузочных работах в портах (на примере порта Ванино) / Л. П. Майорова, А. И. Лукьянов, Е. В. Дахова // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 7. — С. 89–94. — EDN URYDGE.

4. Васина Д. Решение экологических проблем открытых угольных терминалов Владивостока / Д. Васина, И. Рапопорт, И. Тесленко // International journal of Professional Science. — 2021. — № 6. — С. 27–36. — EDN LCGRFS.

5. Кузнецов А. Л. Морские перевозки угля / А. Л. Кузнецов, Н. В. Купцов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков. — М.: ООО «МОРКНИГА», 2023. — 228 с. — EDN ABIOVK.

6. Отделкин Н. С. Влияние технологических операций перегрузки сыпучих грузов грейфером на потери от пылеобразования / Н. С. Отделкин, Е. И. Адамов // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 2(103). — С. 39–44. DOI: 10.34046/aumsuomt103/10. — EDN RSPLCF.

7. Липина С. А. Анализ соответствия информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям в странах ЕС и России / С. А. Липина, А. Е. Закондырин, П. Ю. Ламов // Московский экономический журнал. — 2020. — № 12. — С. 398–407. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114. — EDN YHPIUX.

8. Ежов Ю. Е. Повышение эффективности борьбы с угольной пылью за счет проведения комплексных мероприятий на примере Мурманского морского торгового порта / Ю. Е. Ежов, В. А. Сидоренко, Д. А. Филиппова // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 16–25 сентября 2019 года. — Т. 1. — СПб.: Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2019. — С. 181–193. — EDN YONEKG.

9. Мазуренко О. И. Дискретно-событийное моделирование морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 2. — С. 102–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114. — EDN VJTUYJ.

10. Казбагаров Р. А. Оптимизация транспортно-логистических процессов погрузочно-разгрузочного комплекса морского грузового терминала для навалочных грузов / Р. А. Казбагаров // Yessenov science journal. — 2024. — № 2 (47). — С. 146–152. DOI: 10.56525/VPYL7697.

## REFERENCES

1. Philipp, R., G. Prause, E. O. Olaniyi and F. Lemke. “Towards Green and Smart Seaports: Renewable Energy and Automation Technologies for Bulk Cargo Loading Operations.” *Environmental and Climate Technologies* 25.1 (2021): 650–665. DOI: 10.2478/rtuect-2021-0049.

2. Muradova, Z. R. and A. B. Abakarova. “Analysis of trends and features of seaports’ development in the russian federation.” *Vestnik Universiteta* 8 (2021): 74–80. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-8-74-80.

3. Mayorova, L. P., A. I. Luk’yanov and E. V. Dakhova. “Modeling the spread of coal dust suspension during storage and loading and unloading operations in ports (for example, the port of vanino).” *Innovation & Investment* 7 (2021): 89–94.

4. Vasina, D., I. Rapoport and I. Teslenko. “Reshenie ehkologicheskikh problem otkrytykh ugol’nykh terminalov Vladivostoka”. *International journal of Professional Science* 6 (2021): 27–36.

5. Kuznetsov, A. L., N. V. Kuptsov, A. V. Kirichenko and O. V. Solyakov. *Morskije perevozki uglya Moskva: OOO “MORKNIGA”*, 2023: 228.

6. Otdelkin, N. S. and E. I. Adamov. “Impact of technological operations of loading bulk cargo grapple for dust loss.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(103) (2022): 39–44. DOI: 10.34046/aumsuomt103/10.

7. Lipina, S. A., A. E. Zakondyrin and P. Yu. Lamov. “Analysis of compliance of information and technical reference books on the best available technologies in the eu and russia.” *Moscow Economic Journal* 12 (2020): 398–407. DOI: 10.24411/2413–046X-2020-10851.

8. Ezhov, Yu. E., V. A. Sidorenko and D. A. Filippova. “Povyshenie effektivnosti bor’by s ugol’noy pyl’yu za schet provedeniya kompleksnykh meropriyatij na primere Murmanskogo morskogo trgovogo porta.” *Sbornik nauchnykh statey natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava FG-BOU VO “GUMRF imeni admirala S. O. Makarova”, Sankt-Peterburg, 16 sentyabrya — 25 2019 goda. Tom 1.* Sankt-Peterburg: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2019: 181–193.

9. Mazurenko, O. I. and I. A. Rusinov. “Discrete-event simulation of sea cargo front of export coal terminal in anylogic environment.” *Vestnik of Astrakhan state technical university. series: marine engineering and technologies* 2 (2022): 102–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114.

10. Kozbagarov, R. A. “Optimization of transport and logistics processes of the loading and unloading complex of the marine cargo terminal”. *Yessenov science journal* 47.2 (2024): 146–152. DOI: 10.56525/VPYL7697.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чихачев Александр Викторович** —  
 ведущий инженер, аспирант  
*Научный руководитель:*  
 Ежов Юрий Евгеньевич  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ»  
 198035, Россия, Санкт-Петербург, Межевой канал,  
 д. 3, корп. 2  
 e-mail: [Aleksandr.Chihachev@lenmor.ru](mailto:Aleksandr.Chihachev@lenmor.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Chihachev, Aleksandr V.** —  
 Lead Engineer, postgraduate  
*Supervisor:*  
 Ezhov, Yurii E.  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
 Russian Federation  
 LENMORNIIPROEKT, JSC  
 3/2 Mezhevoy kanal, St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [Aleksandr.Chihachev@lenmor.ru](mailto:Aleksandr.Chihachev@lenmor.ru)

Статья поступила в редакцию 10 марта 2025

Received: Mar. 10, 2025

## PROBLEMS OF NORMATIVE AND TECHNICAL REGULATION IN THE PROJECT STAGE OF DREDGING WORKS IN THE WATER AREA OF SEAPORTS

Ya. E. Brazovskaya<sup>1</sup>, N. S. Kadovb<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> LLC MC VODOKANALSTROY, St. Petersburg, Russian Federation

*This article examines the regulatory challenges at the project stage of dredging works in the water areas of seaports in the Russian Federation. The authors highlight the absence of a unified regulatory framework due to the high fragmentation of legislation and the predominance of bylaws. This fragmentation complicates project implementation, slows the modernization of port infrastructure, and increases the risk of administrative barriers. Special attention is given to environmental aspects, including environmental impact assessment procedures, as well as the strategic role of port infrastructure in the development of the Northern Sea Route (NSR), which is recognized as a key element of national transport policy. The study analyzes the main phases of the project stage: selection of design organizations, engineering surveys, approval of documentation by Rosrybolovstvo, environmental expertise, and obtaining permits for bottom soil disposal. Systemic problems are identified, such as duplication of norms, inconsistencies in bylaws, and the emergence of informal departmental requirements, leading to monopolization of the design services market and reduced regulatory efficiency. The authors propose regulatory improvements, including the development of unified standards covering all design stages and consolidation of disparate bylaws into single regulatory documents. The need for a clear distinction between mandatory and advisory requirements for project documentation is emphasized to minimize subjectivity in regulatory decision-making. Coordination among Rosrybolovstvo, Rosprirodnadzor, and other agencies is also stressed to eliminate contradictions in regulatory practice. The analysis is based on a broad range of sources, including federal laws, executive branch acts, and technical standards. The results are of practical significance for public authorities, design organizations, and stakeholders in hydraulic engineering construction, aiming to enhance the efficiency of infrastructure project implementation amid increasing environmental safety demands and strategic state interests.*

*Keywords: dredging, project documentation, seaport, environmental expertise, standardization, port infrastructure, Northern Sea Route.*

### For citation:

Brazovskaya, Yana E. and N. S. Kadovb “Problems of normative and technical regulation in the project stage of dredging works in the water area of seaports.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechno-goflota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 396–407. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-396-407.

УДК 349.6:627.1

## ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТНОГО ЭТАПА ВЫПОЛНЕНИЯ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ В АКВАТОРИИ МОРСКИХ ПОРТОВ

Я. Е. Бразовская<sup>1</sup>, Н. С. Кадовб<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «УК ВОДОКАНАЛСТРОЙ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В рамках обзорной статьи исследованы проблемы регулирования проектного этапа дноуглубительных работ в акваториях морских портов Российской Федерации. Акцентировано внимание на отсутствии единого нормативного подхода к организации данных работ, что обусловлено высокой степенью фрагментации законодательства и преобладанием подзаконных актов. Отмечается, что подобная ситуация создает сложности в реализации проектов, замедляя модернизацию портовой инфраструктуры и повышая*

риски административных барьеров. Особое внимание уделено экологическим аспектам, включая процедуры экологической экспертизы, а также стратегической роли портовой инфраструктуры в контексте развития Северного морского пути, позиционируемого как ключевой элемент национальной транспортной политики. В рамках исследования проанализированы основные стадии проектного этапа: выбор проектной организации, проведение инженерных изысканий, согласование документации в Росрыболовстве, экологическая экспертиза и получение разрешений на захоронение донного грунта. Выявлены системные проблемы, связанные с дублированием норм, разночтениями в подзаконных актах и формированием неформальных ведомственных требований, что ведет к монополизации рынка проектных услуг и снижению эффективности регуляторных процедур. Предложены пути совершенствования регулирования, включая разработку унифицированных стандартов, охватывающих все этапы проектирования и консолидацию разрозненных подзаконных актов в единые нормативные документы. Подчеркивается необходимость четкого разграничения обязательных и рекомендательных требований к проектной документации, что позволит минимизировать субъективизм при принятии решений контролирующими органами. Особо отмечается важность координации между Росрыболовством, Росприроднадзором и другими ведомствами для устранения противоречий в регулятивной практике. Проведенный анализ выполнен на базе использования широкого спектра источников: федеральных законов, актов органов исполнительной власти и технических стандартов. Результаты исследования имеют практическую значимость для органов государственной власти, проектных организаций и участников рынка гидротехнического строительства, ориентированных на повышение эффективности реализации инфраструктурных проектов в условиях повышения требований к экологической безопасности и стратегическим интересам государства.

*Ключевые слова:* дноуглубительные работы, проектная документация, морской порт, экологическая экспертиза, стандартизация, портовая инфраструктура, Северный морской путь.

**Для цитирования:**

Бразовская Я. Е. Проблемы нормативного и технического регулирования проектного этапа выполнения дноуглубительных работ в акватории морских портов / Я. Е. Бразовская, Н. С. Кадовб // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 396–407. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-396-407. — EDN KAUFJD.

---

### Введение (Introduction)

Российская Федерация определяет в качестве своих ключевых целей развитие портовой инфраструктуры, увеличение общей доли торгового флота, а также создание новых торговых путей. Поддержание и улучшение портовой инфраструктуры требуют проведения ряда работ, включая строительство гидротехнических сооружений. Комплекс работ, предполагающий модернизацию портовой инфраструктуры, представляет собой гидротехническое строительство, одним из ключевых элементов которого являются дноуглубительные работы, так как нормальное функционирование транспорта невозможно без осуществления комплекса путевых и прежде всего дноуглубительных работ. В настоящее время в разряде актуальных находятся задачи проектирования прежде всего дноуглубительных работ, так как сформировавшиеся условия производства путевых работ определяют требования по сокращению объемов и повторности производства дноуглубительных работ [1].

Дноуглубительные работы имеют критически важное значение для инфраструктуры морских портов и портов Северного морского пути (далее — СМП), рассматриваемого, по словам Президента России, как «востребованная глобальная артерия, перевозки по которой в перспективе могут превысить 150 млн т»<sup>1</sup> [2, с. 181]. Для достижения этой цели необходима модернизация портов, расположенных вдоль СМП. Портовая деятельность является стратегическим аспектом развития экономики государства и одним из ключевых звеньев функционирования его транспортной системы. Значительной является роль портов в обеспечении транспортной независимости, обороноспособности и внешней торговли. Через порты проходят многие экспортные и импортные грузы, которые направляются во многие страны, расположенные далеко от морских границ России. Это важный, а, порой, и главный пункт, через который осуществляются внешнеторговые опера-

---

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 года № 2115-р «План развития Северного морского пути на период до 2035 года» // Официальный сайт Правительства Российской Федерации: <http://static.government.ru/media/files/StA6ySKbBceANLRA6V2sF6wbOKSyxNzw.pdf> (дата обращения: 01.12.2024 г.).

ции, — оживленный перекресток международных транспортных коммуникаций, место размещения многочисленных промышленных предприятий [3]. В связи с этим правовое регулирование строительной деятельности в акватории портов становится все более актуальным.

Единый термин «дноуглубительные работы» отсутствует в рамках российского законодательства, однако используется в ряде статей федеральных законов «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»<sup>2</sup>, «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации»<sup>3</sup> и др. На основе содержания указанных нормативно-правовых актов, а также судебной и договорной практик можно установить содержание термина «дноуглубительные работы». Так, дноуглубительные работы [4], [5] представляют собой комплекс земляных работ нулевого цикла строительства, проведение которых направлено на формирование подводной поверхности, используемой в дальнейшем для выполнения иных этапов гидротехнического строительства или непосредственного использования. Для выполнения строительных работ объектов капитального строительства неотъемлемой частью является проектная документация, что в части дноуглубительных работ обусловлено ст. 49 «Градостроительного кодекса Российской Федерации»<sup>4</sup>.

С целью обеспечения унифицированного подхода к развитию портовой инфраструктуры разрабатываются специализированные акты, в части дноуглубительных работ — Стандарт организации 14649425–0005–2019, совместно с ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» и ФГУП «Росморпорт»<sup>5</sup>. Указанный документ разграничивает этапы выполнения договора на дноуглубительные работы: проектирование, согласование, выполнение работ и сдачу результатов работ. Согласование проектной документации и получение специализированных разрешений представляет собой базу защиты публичных интересов государства в части предварительного регулирования реализации дноуглубительных работ. Остальные этапы носят вторичный характер и непосредственно связаны с исполнением работ.

Целью настоящего исследования является рассмотрение публичного регулирования проектного этапа выполнения дноуглубительных работ, в частности, выбор проектной организации, получение разрешений в Росрыболовстве и т. д., а также формирование предложений по развитию регулирования указанных процедур.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Основой публичного регулирования проектного этапа выполнения работ являются нормативно-правовые акты как законы, так и подзаконные акты. Первые устанавливают общее регулирование, вторые — специальное. Разработка проектной документации может быть реализована как проектной, так и подрядной организацией, которая в дальнейшем будет осуществлять выполнение дноуглубительных работ. Выбор организации осуществляется посредством механизмов, предусмотренных Федеральным законом «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц»<sup>6</sup>.

Проектная организация, с которой был заключен контракт, обязуется разработать проектную документацию, в которую в обязательном порядке входят: пояснительная записка, проект организации строительства, оценка воздействия на окружающую среду, оценка воздействия

<sup>2</sup> Федеральный закон от 08.11.2007 № 261-ФЗ «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // ИПС «КонсультантПлюс».

<sup>3</sup> Федеральный закон «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации» от 31.07.1998 № 155-ФЗ // ИПС «КонсультантПлюс».

<sup>4</sup> Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (далее — ГрК РФ) // ИПС «КонсультантПлюс».

<sup>5</sup> Стандарт организации «Выполнение дноуглубительных работ в морских портах и на подходах к ним» // Официальный сайт ФГУП «Росморпорт»: [https://www.rosmorport.ru/upload/medialibrary/96b/2019-04-22\\_order\\_144.pdf](https://www.rosmorport.ru/upload/medialibrary/96b/2019-04-22_order_144.pdf). (дата обращения: 27.11.2024 г.)

<sup>6</sup> Федеральный закон «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» от 18.07.2011 № 223-ФЗ // ИПС «КонсультантПлюс».

на водные биологические ресурсы. В то же время приведенный перечень не является исчерпывающим. Так, Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию»<sup>7</sup> устанавливает общие требования для проектной документации, в частности, содержание текстовой и графической частей документов. Однако специальные требования могут быть установлены в приказах Росморпорта, Росатома и иных актах.

Разработку проектной документации невозможно представить без предварительного проведения инженерных изысканий, представляющих собой комплекс исследований природных условий и техногенных факторов для обеспечения безопасного и рационального территориального освоения<sup>8</sup>. Понятие *инженерных изысканий* формализовано в п. 15 ст. 1 ГрК РФ, подчеркивающим их роль в оценке рисков и обосновании проектных решений. Указанный вид работ является инициальным в проектировании и может осуществляться независимо от последующих стадий. Результаты изысканий сохраняют эксплуатационную пригодность при соблюдении нормативных требований. Например, инженерно-топографические планы, согласно п. 5.1.20 СП 47.13330.2016, имеют двухлетний срок действия при условии верификации актуальности данных в соответствии с п. 5.3.4 СП 317.1325800.2017<sup>9</sup> [6]. Таким образом, при разработке проектной документации могут быть использованы ранее полученные результаты инженерных изысканий.

Посредством инженерных изысканий выявляются состав донных грунтов, их несущая способность, а также наличие потенциально опасных зон, таких как оползневые участки или залежи загрязненных отложений. Указанные данные критически важны для расчета устойчивости береговых откосов и предотвращения аварийных ситуаций в процессе работ, например, обрушений или внезапного размыва дна. Кроме того, гидрографическая съемка и анализ рельефа дна позволяют обнаружить скрытые препятствия: затонувшие объекты, каменные гряды или техногенные включения, что минимизирует риски повреждения спецтехники и оптимизирует траекторию движения земснарядов.

Дополнительно следует отметить, что результаты инженерных изысканий также подлежат в силу ст. 49 ГрК РФ наравне с проектной документацией государственной экспертизе (в некоторых случаях — в силу статей 49 и 50 ГрК РФ негосударственной экспертизе). В то же время в силу ч. 3.2 ст. 49 ГрК РФ результаты инженерных изысканий могут быть направлены на экспертизу как отдельно от проектной документации, так и одновременно с ней. Таким образом, после подготовки указанного перечня документов возможна реализация последующих стадий проектного этапа работ. Так, после подготовки первого варианта документации необходимо обеспечить ее согласование в центральном аппарате Федерального агентства по рыболовству (далее — «Росрыболовство») в порядке, установленном Постановлением Правительства РФ от 30.04.2013 № 384 «О согласовании Федеральным агентством по рыболовству строительства и реконструкции объектов капитального строительства, внедрения новых технологических процессов и осуществления иной деятельности, оказывающей воздействие на водные биологические ресурсы и среду их обитания».

Заявка должна содержать информацию о заявителе и о прилагаемой документации. Приложения к заявке отличаются в зависимости от типа объекта, для строительства либо реконструкции которого будут выполняться дноуглубительные работы. Норма об искомой документации носит отсылочный характер к ранее указанному Постановлению Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87, что свидетельствует о прямой взаимосвязи подзаконных актов. Росрыболовство рассматривает заявку и документацию в течение 30 календарных дней и принимает

<sup>7</sup> Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 // ИПС «КонсультантПлюс».

<sup>8</sup> Постановление Правительства РФ от 19.01.2006 № 20 // ИПС «КонсультантПлюс».

<sup>9</sup> Инженерные изыскания для строительства / Подготовлено на основе материала П. С. Долгополова, ООО «СевИнтелИнвест» // ИПС КонсультантПлюс.

решение о согласовании (об отказе в согласовании) с учетом соответствия (несоответствия) планируемых мер по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания.

Среди антропогенных факторов, влияющих на окружающую среду при проведении дноуглубительных работ, следует отметить шумовое воздействие, которое может дезориентировать рыб и морских млекопитающих, повышение мутности воды, ведущее к нарушению фотосинтеза у растений, а также повреждение донных мест обитания в целом. Этот перечень не является исчерпывающим, однако в рамках данной процедуры Росрыболовство ставит своей целью минимизацию воздействия антропогенных факторов на окружающую среду.

В рамках решения о согласовании (об отказе в согласовании) Федеральное агентство по рыболовству указывает в том числе замечания и рекомендации по доработке документации. Отказ в согласовании не является основанием для отказа в повторном направлении заявки в Росрыболовство. Указанное еще раз акцентирует внимание на том, что законодательство в первую очередь ставит своей целью не создание барьера для проведения работ, а защиту биологических ресурсов.

Ключевым нормативно-правовым актом следующей стадии проектного этапа является Федеральный закон «Об экологической экспертизе»<sup>10</sup>. Проектная документация выполнения дноуглубительных работ является объектом экологической экспертизы в силу закона. Указанный Федеральный закон имеет значительное число норм бланкетного характера, отсылающих к подзаконным актам органов исполнительной власти.

Исходя из содержания ст. 14 ФЗ «Об экологической экспертизе», можно установить следующий общий порядок реализации экологической экспертизы:

1. Оплата проведения экспертизы и предоставление заявителем установленных законом документов, в том числе заключений федеральных органов исполнительной власти по объекту государственной экологической экспертизы (при наличии), материалов общественных обсуждений и т. д.
2. Образование экспертной комиссии.
3. Проведение экологической экспертизы.
4. Предоставление заключения (отрицательного или положительного).

По общему правилу экологическая экспертиза проводится Росприроднадзором, однако в случае наличия соответствующих обстоятельств, в частности, вопросов атомной безопасности, может проводиться также иными органами. В качестве примера можно отметить Приказ Ростехнадзора от 27 ноября 2008 г. № 935 «Об организации и проведении государственной экологической экспертизы «Проекта дноуглубительных работ в бухте Новая гавань Ручьи». Приказ содержит указание на уполномоченный орган, срок проведения экспертизы, состав экспертной комиссии, в которую могут входить внештатные эксперты, штатные сотрудники органа, проводящего экспертизу, и штатные сотрудники органов государственной власти субъектов Российской Федерации.

Полученное заключение экспертной комиссии также утверждается приказом федеральной службы. Для положительного заключения экспертизы, проведенной на основе Приказа от 27 ноября 2008 г. № 935, был подготовлен Приказ от 25 декабря 2008 г. № 1016, который подтвердил соответствие проектной документации требованиям законодательства, а также установил срок действия положительного заключения — 2 года. Указанная практика формировалась с 2008 г. и сохранилась на момент проведения настоящего исследования и подготовки настоящей статьи. Приказы находятся в открытом доступе, в частности, на официальном сайте ФГУП «Росморпорт». В то же время выполнение дноуглубительных работ сопряжено с извлечением значительного объема грунта.

Дальнейшее размещение грунта также имеет публичную регуляцию, что обусловлено статусом недр, влиянием на экологию и иными факторами. Данный вопрос урегулирован ст. 37.1 Федерального закона от 31.07.1998 № 155-ФЗ, которая в том числе отграничивает понятие «захоронение донного грунта» от понятия «захоронение отходов», а также устанавливает требования к заявлению и сроки проведения государственных процедур, связанных с захоронением донного грунта.

<sup>10</sup> Федеральный закон от 23.11.1995 № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе» // ИПС КонсультантПлюс.

Срок выдачи разрешения не может превышать 8 мес., включая срок проведения государственной экологической экспертизы, правовое регулирование которой было рассмотрено ранее. В случае предоставления запроса с положительным результатом государственной экспертизы срок выдачи разрешения не может превышать 30 дней с момента регистрации запроса. В то же время государственной услугой является выдача разрешений на захоронение грунта, извлеченного при проведении дноуглубительных работ, во внутренних морских водах и в территориальном море Российской Федерации, регламентируемая следующими подзаконными актами:

- Приказом Росприроднадзора от 17.10.2019 № 636;
- оптимизированным стандартом предоставления государственной услуги «Выдача разрешений на захоронение грунта, извлеченного при проведении дноуглубительных работ, во внутренних морских водах и в территориальном море Российской Федерации»;
- Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.12.2015 № 2753-р;
- Приказом Минприроды России от 24.03.2014 № 147.

Первые два подзаконных акта направлены на оптимизацию государственных процедур. Так, они устанавливают требования к заявлению, уведомлениям и иным документам, формируемым в ходе реализации государственной услуги. По большей части данные акты направлены на координацию деятельности должностных лиц, конкретизируя положения ст. 37.1 Федерального закона от 31.07.1998 № 155-ФЗ.

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.12.2015 № 2753-р устанавливает ограничения для определенных видов грунтов. В частности, не допускается захоронение грунта, содержащего ртуть и ее соединения, радиоактивные вещества, нефть и т. д. Полный список загрязняющих веществ установлен в перечне, утвержденным рассматриваемым распоряжением.

Приказ Минприроды России от 24.03.2014 № 147 направлен на регламентацию обязанности заявителя, получившего разрешение, в частности, последний обязан осуществлять наблюдение за районом захоронения донного грунта и состоянием морской среды. Так, заявитель обязуется предоставлять ежегодный отчет по утвержденной вышеуказанным приказом форме. В отчете должны быть отражены координаты захоронения, характеристики донного грунта, информация о периодичности наблюдений и наблюдающих лицах.

Финальной стадией проектного этапа является прохождение государственной (негосударственной) экспертизы. В соответствии с ч. 3 ст. 49 Градостроительного кодекса РФ экспертиза проектной документации не проводится в случае, если для строительства или реконструкции объекта капитального строительства не требуется получение разрешения на строительство. В ч. 5 ст. 51 Градостроительного кодекса РФ указаны объекты капитального строительства и реконструкции, для осуществления строительства которых предусмотрено получение разрешения на строительство, в том числе гидротехнических сооружений первого и второго классов, устанавливаемых в соответствии с законодательством о безопасности гидротехнических сооружений, строительство, реконструкцию которых планируется осуществить во внутренних морских водах, в территориальном море Российской Федерации. Таким образом, экспертиза проектной документации и результатов изыскательных работ для выполнения дноуглубительных работ носит обязательный характер.

Целью экспертизы является обеспечение безопасности и правомерности строительной деятельности, позволяющее установить соответствие проектных решений действующим строительным, санитарно-эпидемиологическим и экологическим нормативам. Ключевой задачей экспертизы является комплексная оценка технической обоснованности и физической реализуемости объекта, включая анализ устойчивости конструкций к проектным нагрузкам, корректности геотехнических расчетов, а также рациональности выбранных материалов и технологий. Посредством экспертизы исключается возможность реализации проектов, противоречащих фундаментальным принципам механики, гидродинамики или геологии, что предотвращает риски аварийных ситуаций, таких как обрушения, деформации или подтопления. Общий срок экспертизы составляет 42 рабочих дня с возможностью продления до 20 рабочих дней. В то же время указанной срок может быть меньше для некоторых видов работ.

В случае соответствия проектной документации требованиям законодательства со стороны экспертной организации предоставляется положительное заключение. Лишь после прохождения вышеуказанных процедур проект выполнения дноуглубительных работ может быть утвержден. Последующие этапы уже не будут относиться к проектному, однако также имеют значительное влияние на публичное регулирование.

### Обсуждение (Discussion)

После рассмотрения общих начал и непосредственно процедуры регулирования проектного этапа выполнения дноуглубительных работ в Российской Федерации, следует также отметить мнения и практику иностранных специалистов в части регулирования строительства в акваториях морских портов. Наибольший интерес вызывают страны англо-американской правовой семьи в связи со значительной ролью децентрализованных механизмов в процессе регулирования портового строительства.

Следует отметить, что вопрос регулирования дноуглубительных работ неоднократно обсуждался в рамках научных публикаций и имеет значительную научную проработку в США. Так, баланс частных и публичных интересов в рамках дноуглубительных работ был рассмотрен в рамках работы Роберта А. Кагана «The dredging dilemma: how not to balance economic development and environmental protection» [7]. В данной работе Роберт А. Каган анализирует ключевой недостаток американской модели портового строительства — высокую децентрализацию системы регулирования проектов дноуглубления. Так, автор скептически оценивает попытки регионального планирования (например, Национальную программу эстуариев), отмечая, что отсутствие централизованной власти и доминирование локальных экологических приоритетов над национальными интересами не позволяют эффективно развивать портовую инфраструктуру.

Экологический аспект также рассматривается в рамках научных изысканий. Следует отметить статьи «Dredging: Making Waves for Commerce or Environmental Destruction» Роберта С. Мелника и «Safe Harbors: A Comparative Analysis of Dredging Regulation in New England» Тома Фалеса [8], [9], в которых авторы рассматривают соотношение экологических аспектов и необходимость проведения дноуглубительных работ. По мнению авторов, органы государственной власти Великобритании и США часто отдают приоритет экономическому аспекту во вред экологическому, при этом отсутствуют строгие процедуры экологического контроля. Вместе с тем в Российской Федерации уже существует механизм защиты окружающей среды, в частности, контроль Росрыболовства и экологическая экспертиза проектной документации. В связи с этим, на наш взгляд, создание норм дополнительного регулирования с целью защиты экологии при выполнении дноуглубительных работ в России не является актуальным.

Для настоящего исследования наибольшее значение имеет исследование Беккера С. и Брауэра С., результаты которого изложены в статье «Beneficial Use of Dredged Material: Role of State Permitting Programs and Regulations» [10]. Авторы в данной статье отмечают аналогичные проблемы, что и в российском механизме регулирования дноуглубительных работ. В США для реализации дноуглубительных работ и использования грунта необходимы согласования множества органов государственной власти (USACE, VMRC и иных органов), что замедляет реализацию проектов. Относительно децентрализации полномочий можно отметить следующее:

- USACE — регулирует сброс материалов, но из-за недостатка финансирования передает часть ответственности штату.
- VMRC — разрабатывает разрешения для прибрежных проектов, но ее полномочия ограничены приливными зонами.

Авторами работы [10] сделан вывод о необходимости усиления координации между государственными органами и необходимости создания единой заявки для одобрения проекта дноуглубительных работ. Указанные решения могут быть применены и по отношению к механизму одобрения проектной документации в Российской Федерации в связи с наличием аналогичных

проблем. Таким образом, как в США, так и в России имеются схожие проблемы в части регулирования дноуглубительных работ, в том числе в рамках разработки проектов. Отсутствие четкой регламентации полномочий между государственными органами и размытые требования ведут к замедлению разработки проектной документации.

### **Результаты и (Results)**

По завершении исследования основных стадий проектного этапа выполнения дноуглубительных работ с учетом мнения иностранных ученых в части регулирования выполнения дноуглубительных работ, следует отметить характерное для Российской Федерации значительное количество подзаконных актов. Само наличие подзаконного регулирования не свидетельствует о низком уровне юридической техники, напротив, оно позволяет регламентировать вопросы, которые законодатель не мог и не должен был отразить в тексте закона. Однако в случае регулирования выполнения дноуглубительных работ высокая роль подзаконных актов и норм бланкетного характера может выступить в качестве отрицательного фактора.

Изменение сформировавшихся государственных механизмов, на наш взгляд, не является целесообразным. В основе настоящего исследования были использованы подзаконные акты государственных органов, регулирующие процесс согласования документации по выполнению дноуглубительных работ. Изменение сложившихся процедур приведет к устареванию сложившейся исполнительской практики и невозможности ее применения к новым отношениям. В связи с указанным необходимо сосредоточиться не на попытке создания новых процедур либо механизмов для определенного региона, а на существующей нынешней системе регулирования. Однако выполненный обзорный анализ основных стадий проектного этапа работ не позволяет выявить одну из ключевых проблем регулирования разработки проектной документации для выполнения дноуглубительных работ. С этой целью необходимо также рассмотреть нормы, непосредственно направленные на установление требований к строительству. В частности, необходимо обратить внимание на очередной подзаконный акт — Постановление Правительства РФ от 06.05.2024 № 589 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации». Этот документ отменил обязательный характер национальных стандартов в сфере строительства, но в то же время внес ряд иных изменений. Например, было увеличено число требований по входящему контролю. Так, теперь стало возможным применение иностранных стандартов в случае, если это предусмотрено проектной документацией.

По мнению авторов настоящего исследования, расширение возможностей сторон в рамках исполнения договора носит, скорее, положительный характер. Повышение пластичности законодательства позволяет реализовывать проекты недоступные при высокой степени формализма регулятивных процедур. Однако рассматриваемое постановление привнесло и ряд проблем, обусловленных спецификой строительной сферы.

Совокупность актов, устанавливающих требования к строительству, представляет собой комплексную систему. Резкое изменение необратимо создает препятствия для применения сложившейся практики. Незначительные изменения, обусловленные повышением качества строительства и уточнение сложившихся механизмов, не наносят вреда сложившимся отношениям, а лишь оптимизируют их, обеспечивая развитие отрасли. В то же время влияние Постановления Правительства РФ от 06.05.2024 № 589 можно сравнить с «регуляторной гильотиной». Постановление вычленило целый пласт норм, регулирующих требования к строительству, не предоставив системного механизма регулирования.

Отсутствие четкой регламентации обязательных и необязательных норм ведет к возникновению возможности злоупотребления со стороны контролирующих органов и формированию неформальных ведомственных требований. В качестве примера неформальных ведомственных требований можно рассмотреть деятельность некомпетентного работника, которому представляют поддельный бланк доверенности. Последний, в связи с отсутствием специальных юридических знаний, не знает требований к доверенности и основывается на своих личных представлениях.

В частности, обращает внимание на цвет бумаги, наличие какой-либо печати, шрифт и личное отношение к предъявителю доверенности. Указанное не только противоречит самой цели предоставления доверенности, но и может служить препятствием для других заявителей. Например, проверяющий доверенность сотрудник привык, что доверенность всегда имеет номер, так что в случае его отсутствия у предъявителя доверенности возникнут ничем не обоснованные затруднения с реализацией прав, делегированных этим документом.

Аналогичные последствия могут наблюдаться для проектных организаций. Контролирующий орган сформирует свои неформальные ведомственные правила, которые позволят лишь малому числу компаний выполнять работу «должным» образом. Проектные организации, имеющие связи с административным ресурсом, смогут за счет знания неформальных ведомственных требований получать положительные заключения. Указанное ведет к монополизации рынка проектных услуг, а также не отвечает целям законодателя.

На практике указанная проблема касается не одного органа, входящего в систему защиты публичных интересов, а всей системы. Из указанного следует, что Росрыболовство, Росприроднадзор и другие органы могут одновременно предъявлять противоречивые требования, что осложняет согласование. Таким образом, на данный момент отсутствие четких правил регламентации обязательных и необязательных требований к строительству, в том числе дноуглубительных работ, является одной из важных и давних [11], [12] отраслевых проблем. По отношению к гидротехническому строительству проблема обязательных требований к строительству могла бы быть разрешена на основе Постановления от 12 августа 2010 г. № 620 «Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта». Однако указанный акт имеет лишь нормы, направленные на общее регулирование строительства объектов морского транспорта, при этом специальные нормы децентрализованы и выражены во множестве подзаконных актах.

### Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что для защиты публичных интересов целесообразным путем развития системы регулирования проектного этапа выполнения работ является совершенствование механизмов координации государственных органов, осуществляющих проверку соответствия дноуглубительной документации требованиям закона, а также регламентация обязательных требований к проектной документации. Предложения, выработанные в рамках настоящего исследования, могут быть представлены в виде следующей таблицы.

№ п/п.	Проблема	Предложение / Решение
1	Недостаточная координация органов при проверке проектной документации	<p><i>Совершенствование механизмов координации государственных органов.</i></p> <p>В рамках настоящего исследования были рассмотрены два стандарта, т. е. указанный подход в части регулирования дноуглубительных работ уже применим в настоящее время. В то же время он касается лишь отдельных процедур, не разъясняя закономерности проектного этапа в целом.</p> <p>В связи с этим целесообразно сформировать единый стандарт, который будет включать пояснения к процедурам проектного этапа, начиная от особенностей проведения общественных обсуждений до получения разрешения на захоронение грунта и прохождения экспертизы проектной документации и результатов изыскательных работ.</p>

2	Разобщенность подзаконных актов и отсутствие обязательных требований к проектной документации в части дноуглубительных работ	<p><i>Объединение и укрупнение подзаконных актов, связанных с дноуглубительным строительством.</i></p> <p>В настоящее время источники регулирования дноуглубительных работ разобщены, созданные различными органами государственной власти, они не образуют целостную систему, часто дублируя друг друга.</p> <p>Разделение регулирования публичных процедур посредством множества источников может также привести к разночтению, не позволит создать единый нормативный аппарат либо замедлит его формирование. Примером может являться Приказ Росприроднадзора от 17.10.2019 № 636 и Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.12.2015 № 2753-р. Данные акты направлены на регулирование одной процедуры и могли бы быть объединены в единый акт, более комплексно осуществляющий регуляцию, однако до сих пор они существуют в виде двух различных подзаконных актов.</p> <p>В рамках укрупненных актов также следует установить и обязательные требования к дноуглубительным работам. Разобщенность требований на данный момент также отрицательно влияет на разработку новых проектов.</p>
---	--	---

Таким образом, можно констатировать, что проектный этап выполнения дноуглубительных работ подразумевает публичное регулирование, обусловленное в первую очередь экологическим аспектом, а также стратегическим значением портовой инфраструктуры. Непосредственно проектный этап включает несколько стадий, начиная с выбора проектной организации заканчивая утверждением проекта после получения положительного решения экологической экспертизы. В то же время современное состояние нормативного регулирования проектного этапа выполнения дноуглубительных работ требует реформирования. Авторы настоящей работы полагают, что указанное реформирование должно быть выражено не в виде замены сложившихся процедур, а в виде объединения подзаконных актов в более крупные для формирования единого нормативного аппарата и создания стандартов, направленных на разъяснение регулирования, в частности, установления обязательных и необязательных требований к проектной документации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калашников А. А.* Проектные решения при устройстве дноуглубительных прорезей / А. А. Калашников // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 208–215. DOI: 10.37890/jwt.vi72.306. — EDN QIRXLU.
2. *Малыгин Д. С.* Логистические особенности Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации (Восточная часть Северного морского пути) / Д. С. Малыгин // Логистика — евразийский мост: Материалы XVII Международной научно-практической конференции, Красноярск, 27–30 апреля 2022 года. Т. Ч. 1. — Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. — С. 180–184. — EDN DGLGED.
3. *Бразовская Я. Е.* Арктическое судоходство / Я. Е. Бразовская. — М.: Моркнига, 2025. — 328 с.
4. *Мушкет И. И.* О некоторых проблемах правового регулирования при выполнении дноуглубительных и дноочистительных работ на реках и озерах / И. И. Мушкет, Д. И. Исаев // Современные проблемы

гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 марта 2019 года. — СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. — С. 757–759. — EDN ZBHLTY.

5. Иглин С. М. Геоэкологическое районирование акватории морского порта Архангельск при проведении дноуглубительных работ / С. М. Иглин, В. Б. Коробов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. — 2021. — № 2. — С. 131–149. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-2-131-149. — EDN XXLRKC.

6. Даева Е. Д. Эксплуатация и ремонт ГТС, находящихся в хозяйственном ведении ФГУП «Росморпорт» / Е. Д. Даева // Гидротехника. — 2021. — № 2(63). — С. 12–13. — EDN KRHNSA.

7. Kagan R. A. The dredging dilemma: how not to balance economic development and environmental protection. / R. A. Kagan. — UC Berkeley: Institute of Governmental Studies, 1990. — 74 p.

8. Melnick R. S. Dredging: Making Waves for Commerce or Environmental Destruction / R. S. Melnic // Vill. Envtl. LJ. — 2008. — Vol. 19. — Pp. 145.

9. Fales T. Safe Harbors: A Comparative Analysis of Dredging Regulation in New England / T. Fales // Ocean & Coastal LJ. — 2016. — Vol. 21. — Pp. 245.

10. Becker S. Beneficial Use of Dredged Material: Role of State Permitting Programs and Regulations / S. Becker, S. Brauer // Virginia Coastal Policy Center. — 2019. — Vol. 56.

11. 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.

12. Фирсов Ю. Г. Проблемы и задачи создания нормативных документов отечественной инженерной гидрографии / Ю. Г. Фирсов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 663–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-663-678. — EDN UITSJE.

## REFERENCES

1. Kalashnikov, A. A. “Design solution for the dredging slots production.” *Russian Journal Of Water Transport* 72 (2022): 208–215. DOI: 10.37890/jwt.vi72.306.

2. Malygin, D. S. “Logistic features of the development strategy for the arctic zone of the russian federation (eastern part of the northern sea route).” *Logistika — evraziyskiy most: Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Krasnoyarsk, 27–30 aprelya 2022 goda. Tom Chast’ I*. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2022: 180–184.

3. Brazovskaya, Ya. E. *Arkticheskoe sudohodstvo*. M.: Morkniga, 2025: 328 p.

4. Mushket, I. I. and D. I. Isaev. “Some aspects of legal regulation during dredging and bottom cleaning works on rivers and lakes.” *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoychivogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii: Sbornik tezisov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 14–15 marta 2019 goda*. Sankt-Peterburg: Rossiyskiy gosudarstvennyy gidrometeorologicheskiy universitet, 2019: 757–759.

5. Iglin, S. M. and V. B. Korobov. “Geoecological zoning of the seaport of arkhangel'sk water area during dredging.” *Ecological Safety Of Coastal And Shelf Zones Of Sea* 2 (2021): 131–149. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-2-131-149.

6. Daeva, E. D. “Operation and maintenance of hydraulic engineering installations under operational management of fsue rosmorport.” *Gidrotekhnika* 2(63) (2021): 12–13.

7. Kagan, R. A. *The dredging dilemma: how not to balance economic development and environmental protection*. UC Berkeley: Institute of Governmental Studies, 1990.

8. Melnick, R. S. “Dredging: Making Waves for Commerce or Environmental Destruction.” *Vill. Envtl. LJ* 19 (2008): 145.

9. Fales, Tom. “Safe Harbors: A Comparative Analysis of Dredging Regulation in New England.” *Ocean & Coastal LJ* 21 (2016): 245.

10. Becker, S. and S. Brauer. “Beneficial Use of Dredged Material: Role of State Permitting Programs and Regulations.” (2019).

11. Firsov, Yu. G. “K voprosu o normativnykh dokumentakh dlya vypolneniya gidrograficheskikh rabot.” *Navigation And Hydrography* 23 (2006): 97–107.

12. Firsov, Yu. G. “Problems and tasks for the development of the russian standards and requirements for engineering and design hydrographic surveying.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 663–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-663-678.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Бразовская Яна Евгеньевна —**

доцент кафедры Международного и морского права  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [bye2004@mail.ru](mailto:bye2004@mail.ru)

**Кадовб Никита Сергеевич —**

Юрисконсультант  
ООО «УК ВОДОКАНАЛСТРОЙ»  
192007, город Санкт-Петербург,  
Днепропетровская ул., д. 14, лит б  
e-mail: [kadovbnslaw@mail.ru](mailto:kadovbnslaw@mail.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Brazovskaya, Yana E. —**

Associate professor of the International  
and Maritime Law Department Admiral Makarov  
State University of Maritime and Inland Shipping,  
198035, Russian Federation, St. Petersburg,  
Dvinskaya St. 5/7  
e-mail: [bye2004@mail.ru](mailto:bye2004@mail.ru)

**Kadovb, Nikita S. —**

Legal Advisor  
LLC MC VODOKANALSTROY  
14, Lit b, Dnepropetrovskaya St., St. Petersburg,  
192007.  
e-mail: [kadovbnslaw@mail.ru](mailto:kadovbnslaw@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 12 марта 2025 г.*

*Received: Mar. 12, 2025.*

## PROJECT OF A SMALL-SIZE FERRY WITH OUTBOARD MOTORS FOR OPERATION ON INLAND WATERWAYS

**A. A. Khmelnitskaya<sup>1</sup>, A. A. Butsanets<sup>2</sup>, K. E. Khmelnitsky<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

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

*This paper presents an empirical study devoted to the operation of ferry crossings in Astrakhan Oblast. The research focuses on four ferry crossings — Bol'shoy Magoy, Sizyy Bugor, Sedlistoye, and Trudfront — selected based on an analysis of the socio-economic characteristics of the settlements within their service areas. The subject of the study is the factors determining the efficiency of ferry crossing operations. As an example, the ferry crossing in the village of Bol'shoy Magoy is examined, including its geographical location, demographic data, and the level of social infrastructure development. The main objective of the research was to identify the problems and factors that reduce the efficiency of ferry operations in the region. To address this, a data analysis method was used, drawing on bibliographic sources and including the study of the technical condition of vessels and infrastructure, as well as analysis of passenger flows. The results of the study showed that the operation of ferry crossings is characterized by low efficiency, due to several factors: the significant age of equipment (the average age of tugs is fifty-eight years, ferries about twenty years), low utilization (fifty percent of potential capacity), poor condition of access roads, and the lack of proper berthing facilities (often represented by unimproved clay embankments). The main conclusion is the urgent need to modernize ferry crossings in Astrakhan Oblast to improve their efficiency and ensure transport accessibility for remote settlements. The results can be used to develop targeted programs for the development of the region's transport infrastructure. One of the acute problems is the depopulation of rural areas, especially pronounced in remote settlements where access routes are interrupted by water barriers and there are no bridge crossings. In such conditions, ferry crossings become an indispensable element of the transport infrastructure, ensuring mobility and connecting rural areas with district and regional centers, where jobs and social services are concentrated. Inefficient operation of ferry crossings, due to an outdated fleet, a shortage of qualified personnel, and difficulties with repairs, leads to a decline in the quality of transport services, which exacerbates the problem of depopulation. The results of this study may be used to develop and implement measures for the modernization of ferry crossings in Astrakhan Oblast and other regions of Russia for the development of transport infrastructure. The obtained data will help optimize the operation of existing ferry crossings, reduce operating costs, and improve the quality of transport services. The proposals developed can be used by local authorities when planning and financing transport infrastructure development projects.*

*Keywords: Ferry crossing, small ferries, Astrakhan Oblast, outboard motor, operational efficiency, service quality, transport accessibility, berthing facility, modernization, inland waterway transport.*

**For citation:**

Khmelnitskaya, Anastasia A., A. A. Butsanets, and K. E. Khmelnitsky "Project of a small-size ferry with outboard motors for operation on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 408–417. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-408-417.

**УДК 468**

## ПРОЕКТ МАЛОМЕРНОГО ПАРОМА С ПОДВЕСНЫМИ ЛОДОЧНЫМИ МОТОРАМИ ДЛЯ РАБОТЫ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

**А. А. Хмельницкая<sup>1</sup>, А. А. Буцанец<sup>2</sup>, К. Е. Хмельницкий<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация.

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

*Представлено эмпирическое исследование, посвященное эксплуатации паромных переправ в Астраханской области. Объектом исследования являются четыре паромные переправы: Большой Магой, Сизый Бугор, Седлистое и Трудфронт, выбранные на основе анализа социально-экономических характеристик населенных пунктов, находящихся в сфере их обслуживания. Предметом исследования являются факторы, определяющие эффективность работы паромных переправ. В качестве примера рассмотрена паромная переправа села Большой Магой с указанием его географического положения, демографических данных и уровня развития социальной инфраструктуры. Цель исследования заключалась в выявлении проблем и факторов, снижающих эффективность работы паромных переправ в регионе. Для решения поставленной задачи использовался метод анализа данных, взятых из библиографических источников, включающий изучение технического состояния судов и инфраструктуры, а также анализ пассажиропотока. В результате исследования было установлено, что функционирование паромных переправ характеризуется низкой эффективностью, обусловленной следующими факторами: значительным возрастом техники (средний возраст буксиров составляет пятьдесят восемь лет, паромов — около двадцати лет), низкой загрузкой (пятьдесят процентов от возможной пропускной способности), неудовлетворительным состоянием подъездных путей и отсутствием надлежащих причальных сооружений (часто представляющих собой необорудованные глиняные насыпи). Главным выводом исследования является наличие острой необходимости в модернизации паромных переправ в Астраханской области для повышения эффективности их работы и обеспечения транспортной доступности удаленных населенных пунктов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки целевых программ по развитию транспортной инфраструктуры региона. Основной задачей исследования являлась объективная оценка эффективности функционирования переправ, расположенных в удаленных сельских населенных пунктах.*

*Ключевые слова: паромная переправа, маломерные паромы, подвесной лодочный мотор, эффективность реализации процессов, качество обслуживания, транспортная доступность, причальное сооружение, модернизация, речные перевозки.*

**Для цитирования:**

*Хмельницкая А. А. Проект маломерного паромы с подвесными лодочными моторами для работы на внутренних водных путях / А. А. Хмельницкая, А. А. Буцанец, К. Е. Хмельницкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 408–417. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-408-417. — EDN MVVHPW.*

### **Введение (Introduction)**

Одной из актуальных проблем является депопуляция сельских территорий, особенно ярко выраженная в удаленных населенных пунктах, подъездные пути к которым имеют водные преграды с отсутствием мостовых переправ. В таких условиях паромные переправы становятся альтернативным элементом транспортной инфраструктуры для обеспечения передвижения, связывая сельские районы с районными и областными центрами, в которых сосредоточены рабочие места и социальные услуги. Неэффективная работа паромных переправ, обусловленная устаревшим парком техники, нехваткой квалифицированного персонала и сложностями с ремонтом, приводит к снижению качества транспортного обслуживания, что усугубляет проблему депопуляции. Астраханская область характеризуется обширным устьем Волги и разветвленной сетью рек, транспортное сообщение между населенными пунктами и местами туристической привлекательности осуществляется только с помощью паромных переправ.

Проблема депопуляции сельских территорий и влияние транспортной доступности активно изучается в рамках различных научных направлений, включая социологию, экономическую географию и демографию. Существуют исследования, посвященные анализу факторов миграции сельского населения, влиянию транспортной доступности развитие сельской местности, а также оптимизации транспортных систем в условиях ограниченных ресурсов [1]–[3]. Вместе с тем отмечается недостаточное количество научной литературы, посвященной специфике паромного сообщения в регионах с развитой речной сетью, а также отсутствие масштабных исследований, в которых выполнен комплексный анализ взаимосвязи эффективности паромных переправ с миграционными процессами в условиях конкретных регионов.

Несмотря на существующие исследования [4]–[8], недостаточно изучены вопросы, связанные с оптимизацией паромного сообщения в условиях ограниченных ресурсов и специфических

географических условий [9], [10]. Отсутствует анализ влияния технического состояния паромного флота, квалификации персонала и эффективности системы ремонта на качество транспортного обслуживания и демографические процессы. Не определены оптимальные модели модернизации паромных переправ, учитывающие экономические и социальные факторы, а также особенности региональных условий. Практические рекомендации по улучшению эффективности паромного сообщения и предотвращению депопуляции сельских территорий проработаны слабо.

Целью данного исследования является анализ способов повышения транспортной доступности населенных пунктов, имеющих водную преграду.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать текущее состояние паромного сообщения в Астраханской области и его влияние на демографические процессы.
2. Спроектировать, построить и испытать построенную модель парома.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки и реализации мер по модернизации паромных переправ в Астраханской области и других регионах России в целях развития транспортной инфраструктуры. Полученные данные позволят оптимизировать работу существующих паромных переправ, снизить затраты на их эксплуатацию и повысить качество транспортного обслуживания. Разработанные предложения могут быть использованы органами местного самоуправления при планировании и финансировании проектов по развитию транспортной инфраструктуры.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Данное исследование основано на качественных методах сбора и анализа данных, дополненных анализом существующей научно-технической литературы. В качестве теоретической базы использовалась научно-техническая литература по организации паромных переправ, включая работы по эксплуатации и обслуживанию паромной техники, экономике транспортных перевозок, а также социологические исследования, посвященные влиянию транспортной доступности на социально-экономическое развитие сельских регионов.

На основе данных, полученных из открытых источников<sup>1,2,3</sup>, было проведено эмпирическое исследование состояния паромных переправ в Астраханской области для объективной оценки их текущего состояния. Для исследования были отобраны четыре паромные переправы, расположенные в удаленных населенных пунктах — селах Большой Магой, Сизый Бугор, Седлистое и Трудфронт. Выбор данных переправ обусловлен анализом социально-экономических характеристик обслуживаемых ими поселений. В частности, село Большой Магой, расположенное в Володарском районе Астраханской области и являющееся административным центром Большемогайского сельсовета, расположено в дельте реки Волги, вблизи р. Сарбай (25 м над уровнем моря). По данным Всероссийской переписи населения 2010 г., в селе проживает 1048 человек (527 мужчин и 521 женщина), из них преимущественно казахи (79,1 %), русские (18,8 %), а также представители татарской, лакской и других национальностей. Наличие в селе Большой Магой дома культуры, библиотеки и православной церкви свидетельствует об определенном уровне социальной инфраструктуры.

В результате визуальных наблюдений на ключевых переправах Астраханской области в эксплуатации находятся четыре проекта буксиров: 1606 (найдено 304 судна<sup>4</sup>), БР-150 (найдено пять

<sup>1</sup> Сведения по контракту работы паромной переправы «Трудфронт» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/commoninfo.html?regNumber=082550000621000055](http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/commoninfo.html?regNumber=082550000621000055) (дата обращения: 06.04.2025).

<sup>2</sup> Министерство транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: [rosavtdor.gov.ru/](http://rosavtdor.gov.ru/) (дата обращения: 06.04.2025).

<sup>3</sup> Автомобильные паромы мира [Электронный ресурс]. Режим доступа: [paromy.ucoz.ru/](http://paromy.ucoz.ru/) (дата обращения: 06.04.2025).

<sup>4</sup> По данным из регистрационной книги Федерального Автономного учреждения «Российское Классификационное общество».

судов), 891Б (найдено семь судов). По данным из регистрационной книги Федерального Автономного учреждения «Российское классификационное общество», самый малый срок эксплуатации буксиров составляет 35–39 лет на конец 2024 г. Буксиры пр. 891Б и БР-150 эксплуатируются от 55 до 79 лет (табл. 1).

Таблица 1

**Количественное распределение буксиров по возрастным группам**

№ п/п.	Возрастная группа (срок эксплуатации буксиров)	1606	БР-150	АМБ	891Б
1	75–79	–	3	–	–
2	65–70	–	2	1	–
3	60–64	–	–	–	5
4	55–59	–	–	–	2
5	45–50	74	–	–	–
6	40–44	122	–	–	–
7	35–39	107	–	–	–
8	16	1	–	–	–

Выявлено 53 паромов, распределение которых по возрастным группам представлено на рис. 1 и в табл. 2. Исходя из полученных данных, срок службы 38 паромов превышает 30 лет, что составляет 72 % от общего числа выявленных паромов. Приведенные данные не являются исчерпывающими, поскольку в Астраханской области в рамках исследования были выявлены три проекта паромов: 608/К, 21550А, 0033/КИБ, эксплуатирующихся на ключевых переправах.

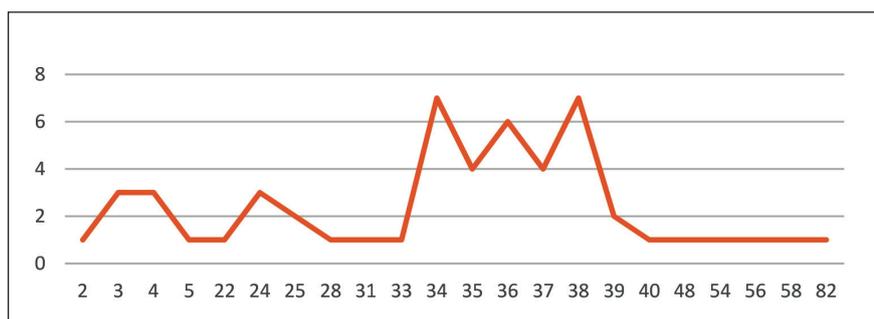


Рис. 1. Распределение количества паромов по сроку эксплуатации, лет

Таблица 2

**Количественное распределение паромов по возрастным группам**

Возрастная группа (срок службы парома)	Количество паромов
80–90	1
50–60	3
40–50	2
30–40	32
20–30	7
0–10	8

При этом следует отметить, что, согласно снимкам из космоса, на территории Астраханской области функционируют более 100 паромных переправ, часть которых предназначена для перевозки туристов на острова с отсутствующей инфраструктурой или принадлежат частным базам отдыха, при этом проекты паромов установить не представляется возможным.

## Результаты (Results)

Поскольку география Астраханской области характеризуется наличием крупных островов, изолированных водными протоками с расположенными в их границах населенными пунктами без наличия обустроенных мостовых переходов и изношенными паромными переправами, свободное и доступное транспортное сообщение прерывается. Поэтому первоочередной задачей является выявление узких мест, препятствующих свободному перемещению местных жителей и туристов внутри региона.

Проанализировав выявленные паромные переправы, авторы исследования пришли к выводу, что одним из возможных решений для Астраханской области является речной маломерный автомобильно-пассажирский паром, оснащенный подвесными лодочными моторами. Данный выбор обусловлен следующими ключевыми факторами, учитывающими как эксплуатационные требования, так и экономическую целесообразность.

1. *Технические параметры и грузоподъемность.* Основным критерием при проектировании парома является его способность осуществлять перевозку четырех автомобилей категории «С» с предельными габаритами: длина 6 м, ширина 2,5 м. Для обеспечения указанной грузоподъемности были рассчитаны оптимальные размеры плавсредства: длина 13 м 330 мм, ширина 8750 мм. Согласно ст. 3 Кодекса внутреннего водного транспорта РФ и Федеральному закону от 23.04.2012 № 36-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части определения понятия маломерного судна» данные параметры позволяют отнести разрабатываемый паром к маломерным судам (длина менее 20 м), что упрощает процедуру его регистрации и эксплуатации. Пассажировместимость судна составляет 12 человек, что полностью удовлетворяет прогнозируемому пассажиропотоку.

2. *Конструктивные особенности.* При разработке конструкции парома было принято решение использовать металлические баллоны в качестве плавучей основы, верхний настил — для размещения транспортных средств и пассажиров. Выбор данной конструкции обусловлен следующими преимуществами:

- технологичность изготовления — баллонная система проще в производстве по сравнению с цельнометаллическим корпусом;
- ремонтпригодность — возможность локального ремонта отдельных элементов;
- экономическая эффективность — снижение себестоимости производства.

Для жесткости баллоны должны быть сварены между собой наборами из уголков и профилей. Сверху паром накрыт настилом из металлических листов, под которыми находятся наборы для жесткости. В качестве движительной системы выбраны подвесные лодочные моторы, что обеспечивает высокую надежность в условиях интенсивной эксплуатации, легкость обслуживания и ремонта, оптимальный расход топлива и гибкость в управлении. Использование подвесных моторов является особенно актуальным для региональных переправ, где необходима оперативность технического обслуживания и доступность запасных частей.

Для оценки технической реализуемости и эксплуатационных характеристик разработанного маломерного парома с подвесными лодочными моторами был создан масштабированный макет, представляющий собой уменьшенную копию судна (масштаб 1 : 35), сохраняющую ключевые конструктивные особенности, но не обладающую функциональностью полноразмерного объекта. Вначале был разработан чертеж, представленный на рис. 2, на основании которого был разработан макет маломерного парома в масштабе 1 : 35.

В качестве материала для изготовления модели парома выбран алюминий, широко применяемый при создании макетов. Для изготовления масштабной модели были использованы следующие алюминиевые полуфабрикаты:

- труба круглого сечения диаметром 50 мм (ГОСТ 18475–82);
- листовой прокат толщиной 0,5 м (ГОСТ 21631–76);
- профильная труба прямоугольного сечения 20 × 40 мм (ГОСТ 13663–86);
- швеллер 20 × 15 мм (ГОСТ 8240–97);
- уголок равнополочный 1,5 × 1,5 мм (ГОСТ 8509–93).

Для изготовления масштабной модели парома была организована специализированная рабочая зона, оснащенная следующим оборудованием: торцовочной пилой, сварочным аргонно-дуговым аппаратом, угловой шлифовальной машинкой, дрелью, рулеткой, маркером, защитной маской, защитными очками, перчатками, крагами.

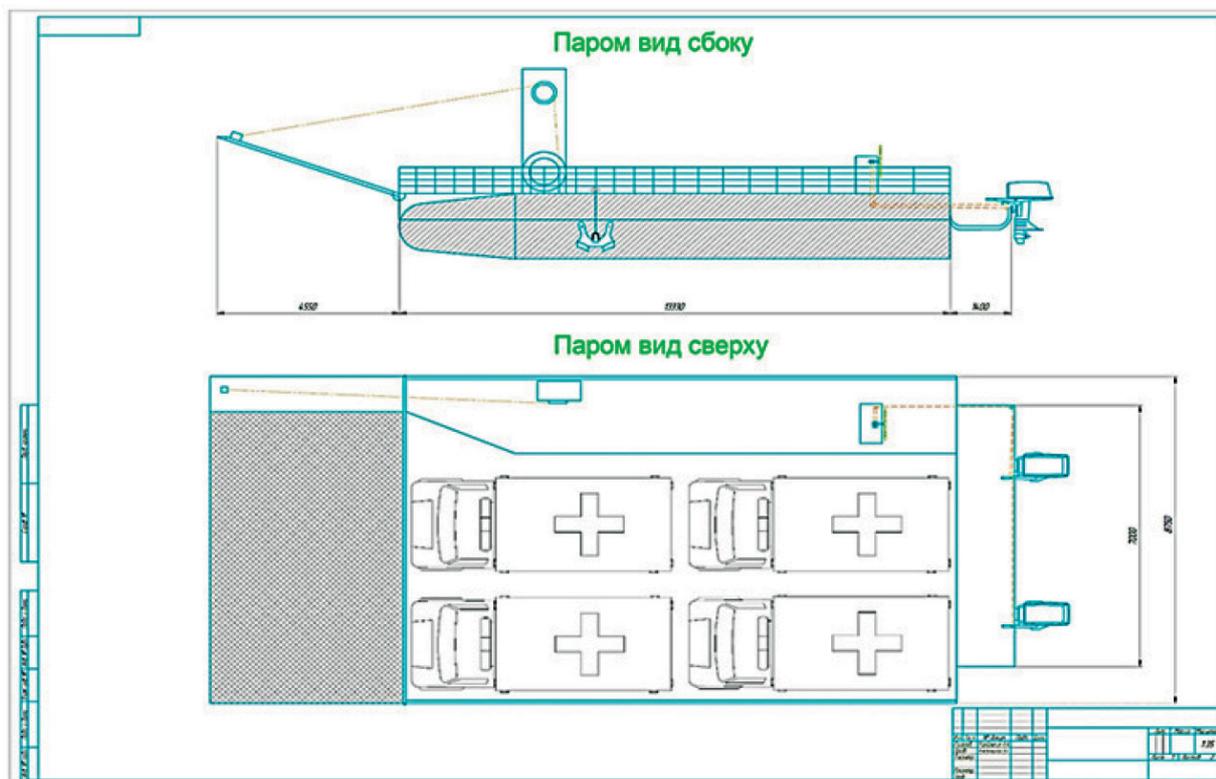


Рис. 2. Чертеж маломерного парома

Технологические операции изготовления включали следующие этапы.

На первом этапе трубные заготовки подверглись точной торцовке с последующей конусной обработкой кромок. Сварные соединения выполнены аргонно-дуговым методом. Финишная обработка швов выполнена шлифовальным кругом.

На втором этапе сзади в качестве транца был приварен швеллер, а также из самодельных петель и еще одного куска алюминиевого листа изготовлена аппарель и приварены ограждения.

Третий этап включал создание и монтаж системы подъема и удержания аппарели, управляющей панели со штурвалом, ограждений, отделяющих автомобильную зону от пассажирской; подвесных лодочных моторов, канатного ограждения заднего борта, имитацию освещения и сигнализирующего фонаря, имитацию радиоантенн и флагшток.

Макет был изготовлен для проверки на жизнеспособность проекта маломерного парома с подвесными лодочными моторами, а также проведения испытаний в естественных условиях. Для этого в качестве места проведения испытаний был выбран настоящий пляж. Испытания проводились в облачную, умеренно ветреную погоду. Вначале макет маломерного парома с подвесными лодочными моторами был спущен на воду в порожнем состоянии. По результатам испытаний было установлено, что данный макет устойчиво находится на воде и даже при волнении не был подвержен серьезным отклонениям от исходного состояния. Затем было проведено испытание макета маломерного парома с подвесными лодочными моторами. В качестве нагрузки были выбраны модели спецтехники и модели автомобилей. При проведении испытания с нагрузкой было установлено что паром изменил свою осадку, но при этом все также был устойчив и стабилен на воде. Ход испытаний приведен на рис. 3.

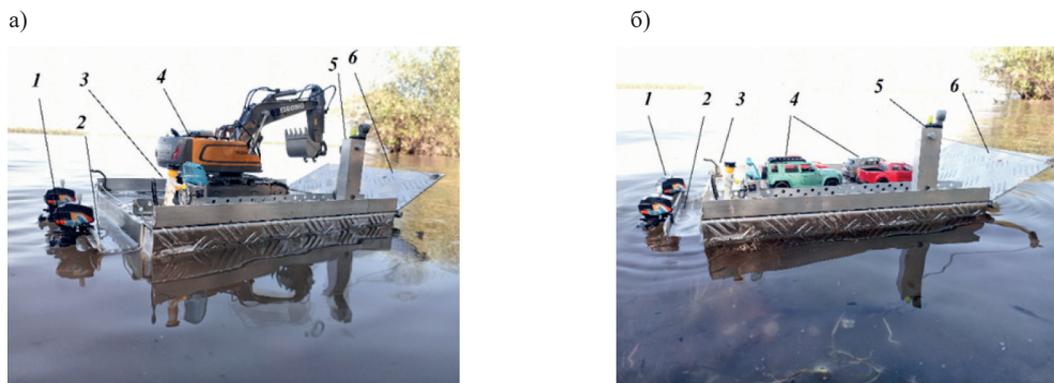


Рис. 3. Испытание макета: а — перевозка спецтехники; б — перевозка легкового автотранспорта:  
1 — подвесной лодочный мотор; 2 — транец; 3 — рабочее место рулевого;  
4 — перевозимый транспорт; 5 — система управления аппарелью с расположением осветительной аппаратуры; 6 — аппарель

Анализ нормативно-правовой базы показал, что оформление разрешительных документов по эксплуатации маломерных паромов существенно проще, чем для традиционных паромных переправ в Астраханской области. Для определения экономического эффекта от внедрения модели был выполнен экономический расчет по организации паромной переправы. Финансовая привлекательность проекта обусловлена возможностью приобретения маломерных судов с договором аренды под 3 % годовых и государственной субсидией в размере 1/3 от стоимости. Учитывая, что существующие паромные переправы Астраханской области являются убыточными и поддерживаются из бюджета, предложенная модель маломерного парома с подвесными лодочными моторами способствует снижению бюджетных расходов на содержание паромного сообщения.

Операционная эффективность проекта обоснована сроком окупаемости проекта 3–5 лет и годовой экономией бюджета до 8 млн руб. на одну переправу. Главными преимуществами с экономической точки зрения являются:

- снижение эксплуатационных расходов на 40–45 %;
- повышение пропускной способности на 25–30 %;

Ключевые показатели эффективности представлены в табл. 3. Данные приведены для одной переправы. Маломерный паром снижает затраты на 46 %.

Таблица 3

**Сравнение показателей эффективности используемых и предлагаемых паромов**

Технические характеристики проекта парома	21550А	Проект 608/К	Предлагаемый проект маломерного парома
Валовая вместимость, т	70,3	125,8	45,7
Дедвейт, т	60	80	30,0
Водоизмещение, т	93	137	52
Длина габаритная, м	24,25	27	16
Длина конструктивная, м	17,1	25,33	13,3
Ширина габаритная, м	8,19	9,18	8,8
Ширина конструктивная, м	8	9	7,2
Высота борта, м	1,53	1,8	1,35
Осадка судна, м	0,78	0,74	0,65
Надводный борт, м	0,75	1,06	0,7

Предложенное техническое решение демонстрирует оптимальное сочетание функциональности, экономичности и ремонтпригодности, что является особенно важным для обеспечения бесперебойной работы паромных переправ в условиях Астраханской области. Поэтому дальней-

шие исследования будут направлены на совершенствование конструкции с учетом специфических климатических и гидрологических условий региона.

### **Обсуждение (Discussion)**

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков различных типов паромных переправ, а также учет специфических климатических и географических условий Астраханской области привели к выбору модели маломерного парома с подвесными лодочными моторами в качестве оптимального решения<sup>5</sup>.

Предлагаемая модель маломерного парома обладает рядом преимуществ, среди которых компактные размеры (длина менее 19 м), высокая ремонтпригодность благодаря модульной конструкции с легко заменяемыми подвесными лодочными моторами, сниженная потребность в персонале (достаточно одного судоводителя), а также низкие требования к квалификации персонала (достаточно прав ГИМС). Все эти факторы обеспечивают существенное снижение стоимости как самого парома, так и его эксплуатации. Единственным значительным недостатком является невозможность эксплуатации в ледовых условиях. Однако учитывая непродолжительный ледостав в Астраханской области этот недостаток является несущественным.

В Икрянинском районе функционируют шесть паромных переправ, на содержание каждой из которых ежегодно выделяется в среднем свыше 11 млн руб. Предлагаемая модель маломерного парома с подвесными лодочными моторами потребует порядка 3 млн руб. в год, что с учетом предполагаемой прибыли подрядчика (20 %) составит 3, 8 млн руб. Таким образом, использование предлагаемой модели позволит значительно сократить бюджетные расходы на обеспечение паромного сообщения в регионе.

Данный проект паромной переправы некоммерческий и не ориентирован на получение прибыли. Анализ финансовых показателей не исключает возможность возникновения убытков. В подобных случаях государственная поддержка пассажирских перевозок, осуществляемая путем прямого субсидирования, является необходимой мерой для обеспечения транспортной доступности и поддержания занятости населения в регионе.

### **Заключение (Conclusion)**

Проведенное исследование показало, что использование маломерных паромов с подвесными лодочными моторами для обеспечения паромного сообщения в удаленных сельских районах Астраханской области является перспективным решением. Анализ технических характеристик, нормативно-правовой базы и экономической целесообразности демонстрирует преимущества данной модели по сравнению с традиционными паромными переправами. К основным преимуществам относятся: компактность, высокая ремонтпригодность, низкие требования к персоналу и существенное снижение эксплуатационных расходов. Несмотря на ограниченную применимость в ледовых условиях данный недостаток компенсируется коротким периодом ледостава в регионе. Расчет затрат демонстрирует сокращение бюджетных расходов на содержание паромного сообщения по сравнению с существующими переправами.

В качестве рекомендаций по вопросам дальнейшего развития возможно выполнение пилотного проекта по внедрению маломерных паромов в выбранных районах Астраханской области, а также необходима разработка более детальной экономической модели, учитывающей всевозможные риски и факторы с учетом данных пилотных исследований. В перспективе развития проекта планируется анализ возможности использования альтернативных источников энергии для привода подвесных лодочных моторов.

В ходе выполнения анализа транспортной доступности населенных пунктов Астраханской области было обращено внимание на обустройство либо усовершенствование существующих паромных переправ, проанализированы и выявлены основные паромные переправы, являющиеся един-

<sup>5</sup> Методические рекомендации по устройству, ремонту, содержанию и эксплуатации паромных переправ и наплавных мостов [Электронный ресурс]. URL: docs.cntd.ru/document/1200109003 (дата обращения: 06.04.2025).

ственной возможностью выезда с островов (участки суши, ограниченные водными преградами), такие как Волго-Каспийский, Хмелевка, Икряное-Маячное, Большой Могой, Марфино, Федоровское, Верхнелебяжье, Трудфронт, Табун-Арал и Владимировка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джафаров Э. Э. Влияние улучшения инфраструктуры на развитие сельских территорий / Э. Э. Джафаров // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок: В 4 т. Курск, 01 декабря 2022 года. Т. 3. — Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. — С. 335–338. — EDN WOWCJN.

2. Старостенко М. В. Влияние инфраструктуры на развитие сельских территорий в Запорожской области / М. В. Старостенко, Н. И. Болтынская // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе: Материалы I Международной научно-практической конференции, Мелитополь, 22–23 ноября 2022 года. — Мелитополь: Государственное образовательное учреждение высшего образования «Мелитопольский государственный университет», 2022. — С. 76–79. — EDN TQFROW.

3. Белякова Е. В. Роль транспортно-логистической инфраструктуры в социально-экономическом развитии региона / Е. В. Белякова, В. А. Крамков // Логистические системы в глобальной экономике. — 2018. — № 8. — С. 70–73. — EDN XWELCP.

4. Дружинин П. В. Взаимосвязь развития транспорта и экономики республики Карелия / П. В. Дружинин, В. А. Новиков // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2015. — № 2(45). — С. 40–48. — EDN VNOPWZ.

5. Масалева М. В. Социально-экономические подходы в развитии транспортной инфраструктуры сельской местности / М. В. Масалева // Достижения аграрной науки для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации: сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Тюмень, 19 декабря 2022 года. — Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2022. — С. 64–69. — EDN CFIDBU.

6. Капустина Н. В. Влияние транспортной инфраструктуры на социально-экономическое развитие сельской местности / Н. В. Капустина // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № S5. — С. 14. — EDN GQJZYW.

7. Абрамян А. Э. Оценка вклада магистральной транспортной инфраструктуры при решении проблем экономического упадка сельской местности / А. Э. Абрамян // Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. — Серия 1: Экономика и управление. — 2024. — № 1(48). — С. 85–92. DOI: 10.21777/2587-554X-2024-1-85-92. — EDN JJGGUS.

8. Шамин Р. Р. Экономическая эффективность инвестиций в развитие многофункциональных элементов производственно-социальной инфраструктуры сельских территорий / Р. Р. Шамин // Аграрный вестник Верхневолжья. — 2016. — № 2(15). — С. 103–113. — EDN TWLUIN.

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

10. Киншт А. В. Развитие системы общественного транспорта как один из факторов экологизации городской среды / А. В. Киншт, Е. Д. Малова // Вестник Томского государственного архитектурно — строительного университета. — 2021. — Т. 23. — № 3. — С. 46–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-46-57. — EDN XTDBFH.

## REFERENCES

1. Dzhafarov, E. E. “Vliyanie uluchsheniya infrastruktury na razvitie sel’skikh territoriy.” *Innovatsionnyy potentsial razvitiya obschestva: vzglyad molodykh uchenykh: sbornik nauchnykh statey 3-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok: v 4 t., Kursk, 01 dekabrya 2022 goda. Tom 3.* Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022: 335–338.

2. Starostenko, M. V. and N. I. Boltyanskaya. “Vliyanie infrastruktury na razvitie sel’skikh territoriy v Zaporozhskoy oblasti.” *Tekhniko-tehnologicheskoe obespechenie innovatsiy v agropromyshlennom komplekse: Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Melitopol’, 22–23 noyabrya 2022 goda.* Melitopol’: Gosudarstvennoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya “Melitopol’skiy gosudarstvennyy universitet”, 2022: 76–79.

3. Belyakova, E. V. and V. A. Kramkov. "Factors of influence affecting the formation and development of transport and logistic infrastructure of the regions of russia." *Logisticheskie sistemy v global'noy ekonomike* 8 (2018): 70–73.
4. Druzhinin, P. V. and V. A. Novikov. "Relationships between transport and economy in the republic of karelia." *The North And The Market: Forming The Economic Order* 2(45) (2015): 40–48.
5. Masaleva, M. V. "Sotsial'no-ekonomicheskie podkhody v razvitii transportnoy infrastruktury sel'skoy mestnosti." *Dostizheniya agrarnoy nauki dlya obespecheniya prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: Sbornik trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov, Tyumen', 19 dekabrya 2022 goda*. Tyumen': Gosudarstvennyy agrarnyy universitet Severnogo Zaural'ya, 2022: 64–69.
6. Kapustina, N. V. "The impact of transport infrastructure on the socio-economic development of rural areas." *Vestnik evraziyskoy nauki* 15.S5 (2023): 14.
7. Abramyan, A. E. "Assessment of the contribution of the main transport infrastructure in solving the problems of economic decline in rural areas." *Vestnik Moskovskogo universiteta im. S. Yu. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie* 1(48) (2024): 85–92. DOI: 10.21777/2587–554X-2024–1–85–92.
8. Shamin, R. R. "Economic efficiency of investments in the development of multi-production and social infrastructure in rural areas." *Agrarnyy vestnik Verkhnevolzh'ya* 2(15) (2016): 103–113.
9. Zhidkova, A. M. "Simulation of the barge-tug combinations operation using the matrix routing method." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1015–1029. DOI: 10.21821/2309–5180–2023–15–6–1015–1029.
10. Kinsht, A. V. and E. D. Malova. "Development of public transport system as a factor in greening the urban environment." *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* 23.3 (2021): 46–57. DOI: 10.31675/1607–1859–2021–23–3–46–57.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Хмельницкая Анастасия Александровна** — кандидат технических наук, доцент Астраханский государственный технический университет.

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: [khmelnitskayaaa@mail.ru](mailto:khmelnitskayaaa@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

e-mail: [butsanetsaa@gumrf.ru](mailto:butsanetsaa@gumrf.ru)

**Хмельницкий Константин Евгеньевич** — кандидат технических наук Астраханский государственный технический университет

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: [chuchera80@mail.ru](mailto:chuchera80@mail.ru)

**Khmelnitskaya, Anastasia A.** — PhD of Technical Sciences, associate professor Astrakhan State Technical University

16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: [khmelnitskayaaa@mail.ru](mailto:khmelnitskayaaa@mail.ru)

**Butsanets, Artem A.** — PhD of Technical Sciences, Head of the Department Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping.

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation  
e-mail: [butsanetsaa@gumrf.ru](mailto:butsanetsaa@gumrf.ru)

**Khmelnitsky, Konstantin E.** — PhD of Technical Sciences Astrakhan State Technical University

16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: [chuchera80@mail.ru](mailto:chuchera80@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 07 апреля 2025 г.

Received: Apr. 7, 2025.

## FINDING THE OPTIMAL VESSEL ROUTE USING A MODIFIED A-STAR ALGORITHM

**A. L. Olovyannikov**

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

*This paper addresses the problem of determining a safe ship route considering the hydro-meteorological conditions along the route. The solution is proposed using graph theory. The shortest route for an ocean crossing is a Great Circle, so the graph is constructed around the Great Circle. The graph nodes are spaced at intervals corresponding to 12 hours of ship passage. For each node, current and forecasted hydro-meteorological data on wind, waves, and surface currents are assigned. A modified A\* (A-Star) algorithm is proposed to solve this problem. Instead of distance, the heuristic function uses the shortest travel time, accounting for speed reductions or increases due to hydro-meteorological influences on each segment between adjacent graph vertices. The proposed algorithm demonstrates high speed in finding the optimal path. Computer simulations illustrate the results of the modified algorithm. The results show significant time savings when navigating the optimal route compared to the Great Circle. This method can be used to develop systems for automated planning of optimal routes considering changing environmental conditions.*

*Keywords: A-Star algorithm, hydrometeorological parameters, optimal routing, weather routing, ship speed calculation.*

**For citation:**

Olovyannikov, Arkadiy L. "Finding the optimal vessel route using a modified A-Star algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 418–424. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-418-424.

**УДК 004.94, 656.61.052**

## НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА A-STAR

**А. Л. ОЛОВЯННИКОВ**

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»,  
г. Владивосток, Российская Федерация

*Темой исследования является проблема прокладки безопасного маршрута судна с учетом гидрометеорологической обстановки в районе его следования. Решение задачи предлагается с использованием теории графов. Кратчайшим маршрутом при океанском переходе является дуга большого круга, вокруг которой строится граф. Узлы графа отстоят друг от друга на расстоянии 12-часового перехода судна. Для узлов графа определяется текущая и прогностическая гидрометеорологическая информация о ветре, волнении и поверхностном течении. Для решения этой задачи предлагается использовать модифицированный алгоритм A\* (A-Star). В качестве эвристической функции используется не расстояние, а кратчайшее время прохождения маршрута с учетом потерь или приращения скорости из-за влияния гидрометеорологических факторов на каждом отрезке пути между соседними вершинами графа. Предлагаемый алгоритм обладает высокой скоростью нахождения оптимального пути. Проведено компьютерное моделирование, иллюстрирующее результат работы предлагаемого модифицированного алгоритма. Полученные результаты показывают возможность значительной экономии времени при плавании по оптимальному маршруту по сравнению с плаванием по дуге большого круга. Предложенный метод может быть использован для создания систем автоматизированной прокладки оптимальных маршрутов с учетом меняющихся условий окружающей среды.*

*Ключевые слова: алгоритм A-Star, гидрометеорологические параметры, оптимальный маршрут, погодный маршрут, потери скорости судов.*

**Для цитирования:**

Оловяников А. Л. Нахождение оптимального маршрута судна с использованием модифицированного алгоритма A-Star / А. Л. Оловяников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 418–424. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-418-424. — EDN QMMFUL.

## Введение (Introduction)

Планирование пути означает определение оптимального пути между начальной и конечной точками в пределах заданной карты или пространственной области с учетом конкретных требований и ограничений, включая погодные условия. Традиционные алгоритмы планирования пути предусматривают поиск по принципу «наилучшего первого» (Best-first search (BFS)), алгоритм Дейкстры, алгоритм A\* и их модификации [1], [2]. BFS может обнаруживать пути значительно быстрее, чем алгоритм Дейкстры. Однако BFS действует оптимистично и пытается продвигаться к цели, даже если путь не лучший. Несмотря на то, что алгоритм Дейкстры может найти оптимальный путь, он требует значительного количества вычислительных ресурсов. Эвристический метод поиска A\* был разработан для объединения преимуществ методов BFS и Дейкстры. По сравнению с алгоритмом Дейкстры эффективность поиска пути алгоритма A\* выше.

В настоящей статье рассматривается один из подходов к расчету оптимальных маршрутов судов в условиях их автоматизированной проводки с учетом гидрометеорологических условий плавания [3]. Неблагоприятные гидрометеорологические условия создают опасность для мореплавания и увеличивают продолжительность рейсов. Ветер и волны в океане являются основными факторами, влияющими на безопасность и эффективность плавания. Минимальное расстояние между двумя точками на поверхности Земли определяется по дуге большого круга (ДБК), однако кратчайший путь, как правило, не является оптимальным по времени и безопасным для перехода судна [4], [5]. Традиционно алгоритм A\* использует кратчайшее расстояние как эвристическую функцию для поиска оптимального пути [6]. В работе предлагается использовать для этого время перехода с учетом влияния волнения, ветра и течений на скорость судна.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве примера для исследования был выбран переход Сан-Франциско – Токио через Тихий океан. Для моделирования использовалось условное судно водоизмещением 15000 т и скоростью на тихой воде 15 уз. Учитывая, что кратчайшим маршрутом через океан является дуга большого круга (ДБК), был построен граф вокруг ДБК между двумя пунктами, расширяющийся к центру ДБК (рис. 1). Расстояние и начальный курс между точками ДБК можно рассчитать по формулам:

$$\cos D = \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda; \quad (1)$$

$$\tan K = \frac{\sin \Delta\lambda}{\cos \varphi_1 \cdot \tan \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cdot \cos \Delta\lambda}. \quad (2)$$

Координаты промежуточных точек ДБК для построения графа на расстоянии  $D_x$  от начальной точки:

$$\sin \varphi_x = \sin \varphi_1 \cdot \cos D_x + \cos \varphi_1 \cdot \sin D_x \cdot \cos K; \quad (3)$$

$$\lambda_x = \lambda_1 \pm \arccos \left( \frac{\cos D_x - \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_x}{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_x} \right) \quad (4)$$

Расстояние между узлами графа вдоль ДБК соответствует 12-часовому переходу судна (120 миль). Расстояние между соседними узлами перпендикулярно ДБК — 20 миль.

Реальные гидрометеорологические данные по маршруту перехода были получены из открытых источников: данные по ветру и волнению — с использованием программы XyGrib [7] в формате GRIB2, данные по поверхностным течениям — с помощью сервиса OSCAR [8] в формате netCDF — 4. Полученные данные имеют дискретность 15' по широте и долготе, поэтому значения гидрометеорологических параметров для узлов графа рассчитаны с помощью интерполяции соседних значений. Пример загруженных данных о ветре представлен на рис. 2.

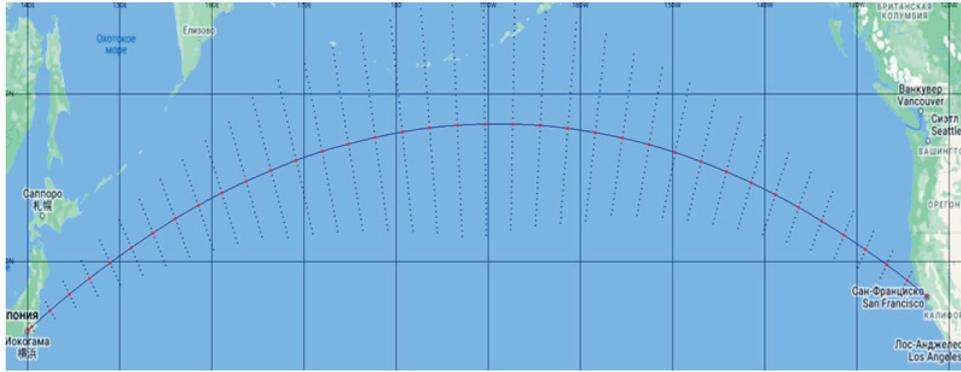


Рис. 1. ДБК и граф перехода Сан-Франциско – Токио

Для построения оптимального пути на полученном графе с учетом гидрометеорологических условий использовался алгоритм A\* (A-star). A\* — алгоритм информированного поиска, или поиск по принципу «сначала лучшее». Это означает, что он сформулирован в терминах взвешенных графов, т. е. начиная с определенного начального узла графа, он стремится найти путь к заданному целевому узлу, имеющему наименьшую стоимость (наименьшее пройденное расстояние). Это достигается путем поддержания *дерева путей*, берущих начало в начальном узле, и расширения их по одному ребру за один раз до тех пор, пока не будет достигнут целевой узел.

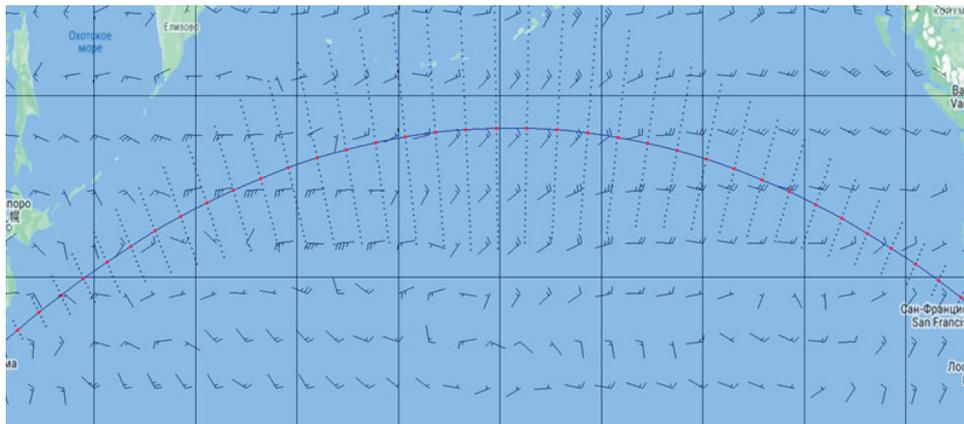


Рис. 2. Распределение ветра на переходе Сан-Франциско – Токио

На каждой итерации своего основного цикла A\* необходимо определить, какой из путей следует расширить. Это делается на основе стоимости пути и оценки стоимости, необходимой для продления пути до цели. В частности, A\* выбирает путь, минимизирующий функцию:

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (5)$$

где  $n$  — следующий узел на пути;

$g(n)$  — стоимость пути от начального узла до  $n$ ;

$h(n)$  — эвристическая функция, оценивающая стоимость наиболее экономичного пути от  $n$  до цели.

Эвристическая функция зависит от проблемы. Если эвристическая функция допустима, т. е. она никогда не переоценивает фактическую стоимость достижения цели, A\* гарантированно вернет путь с наименьшими затратами от начала до цели. Типичные реализации A\* используют очередь с приоритетом для повторного выбора узлов с минимальной (оценочной) стоимостью для рас-

ширения. На каждом шаге алгоритма узел с наименьшим значением  $f(x)$  удаляется из очереди, значения  $f$  и  $g$  его соседей, соответственно, обновляются, и добавляются в очередь. Алгоритм продолжается до тех пор, пока удаленный узел (с наименьшим значением  $f$  из всех конечных узлов) не станет целевым.

В качестве стоимости использовалось кратчайшее время перехода. Для этого расстояние между соседними узлами графа рассчитывалось по формуле (1), а скорость судна с учетом гидрометеорологических условий — следующим образом: сначала учитывалось влияние течения, затем — ветра. Учет течения:

$$V = V_{\tau} \cdot \cos q + \sqrt{V_0^2 + (V_{\tau} \cdot \sin q)^2}; \quad (6)$$

$$K = K_0 + \arctan \left( \frac{V_{\tau} \cdot \sin q}{\sqrt{V_0^2 + (V_{\tau} \cdot \sin q)^2}} \right), \quad (7)$$

где  $K_0, V_0$  — соответственно курс и скорость без учета течения;  
 $K, V$  — соответственно курс и скорость с учетом течения,  
 $V_{\tau}$  — скорость течения;  
 $q$  — курсовой угол течения.

Среди эмпирических формул определения ветро-волновых потерь скорости судов была выбрана формула П. М. Хохлова [9] в связи с ее простотой и удобством использования:

$$V = V_0 - (0,745h - 0,275qh)(1 - 1,3510^{-6} DV_0), \quad (8)$$

где  $V_0$  — скорость судна без учета ветра, рассчитанная по формуле (6), уз;  
 $q$  — курсовой угол волны, рад.;  
 $D$  — водоизмещение, т;  
 $h$  — высота волн 3 % обеспеченности, м.

Учитывая, что в информации о волнении приведена высота «значительных» волн, для получения высоты волн 3%-й обеспеченности использовался коэффициент 1,32. Время перехода между узлами графа рассчитывалось как отношение  $S/V$ .

### Результаты (Results)

Для проверки работы алгоритма и отображения результатов было проведено моделирование в среде программирования Visual Studio. Результаты исследования показали применимость предлагаемого метода для поиска оптимального пути. Графическое отображение оптимального пути представлено на рис. 3. Сплошной линией показана ДБК, пунктиром отмечен оптимальный маршрут. Результаты расчетов приведены в таблице (с. 422).

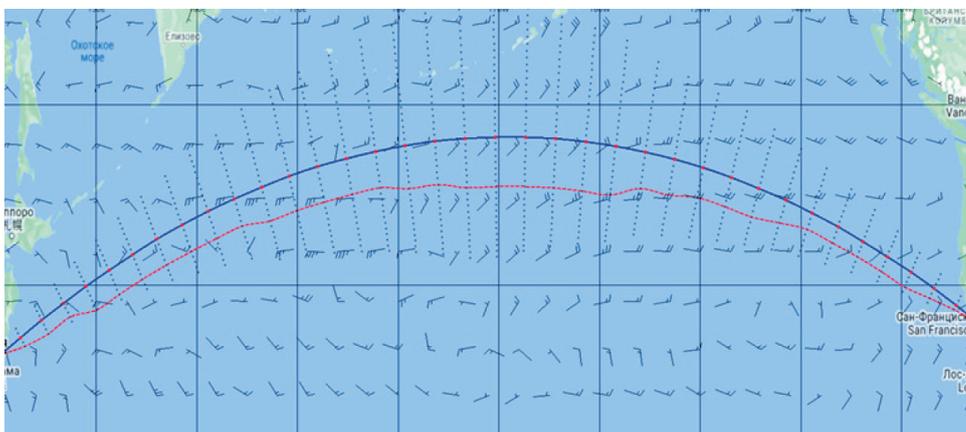


Рис. 3. ДБК и оптимальный маршрут на переходе Сан-Франциско – Токио

**Результаты расчетов плавания по ДБК и оптимальному пути**

№ п/п.	ДБК				Оптимальный маршрут			
	Координаты	S	V	T	Координаты	S	V	T
0	37°40,4'N; 122°25,9'W	120,0	15,0	8,0	37°40,4'N; 122°25,9'W	121,7	15,0	8,1
1	38°44,5'N; 124°35,0'W	120,0	13,6	8,8	38°27,5'N; 124°48,4'W	121,7	13,8	8,8
2	39°46,1'N; 126°48,0'W	120,0	14,5	8,3	39°11,5'N; 127°14,1'W	121,8	14,8	8,2
3	40°45,1'N; 129°04,9'W	120,0	14,9	8,0	39°52,5'N; 129°42,8'W	120,0	15,0	8,0
4	41°41,4'N; 131°25,9'W	120,0	15,0	8,0	40°48,0'N; 132°02,3'W	120,0	15,0	8,0
5	42°34,6'N; 133°50,9'W	120,0	15,0	8,0	41°40,5'N; 134°25,8'W	120,0	14,9	8,0
6	43°24,8'N; 136°20,0'W	120,0	15,0	8,0	42°29,9'N; 136°53,1'W	120,0	15,0	8,0
7	44°11,6'N; 138°53,1'W	120,0	14,9	8,1	43°16,0'N; 139°24,3'W	121,8	15,1	8,1
8	44°54,9'N; 141°30,1'W	120,0	14,9	8,1	43°39,9'N; 142°08,8'W	121,8	14,9	8,1
9	45°34,6'N; 144°11,0'W	120,0	14,8	8,1	43°59,7'N; 144°55,3'W	119,9	15,0	8,0
10	46°10,4'N; 146°55,5'W	120,0	13,0	9,2	44°34,5'N; 147°35,6'W	119,9	14,9	8,1
11	46°42,2'N; 149°43,4'W	120,0	13,1	9,1	45°05,3'N; 150°19,0'W	121,7	14,9	8,1
12	47°09,8'N; 152°34,4'W	120,0	13,3	9,0	45°12,6'N; 153°11,3'W	119,9	14,9	8,0
13	47°33,1'N; 155°28,2'W	120,0	13,2	9,1	45°35,0'N; 155°58,9'W	126,5	14,9	8,5
14	47°52,0'N; 158°24,3'W	120,0	13,2	9,1	45°13,6'N; 158°56,6'W	119,7	14,8	8,1
15	48°06,3'N; 161°22,4'W	120,0	14,3	8,4	45°27,2'N; 161°45,8'W	119,7	14,9	8,0
16	48°16,1'N; 164°21,8'W	120,0	14,4	8,4	45°36,4'N; 164°36,2'W	119,7	14,8	8,1
17	48°21,1'N; 167°22,1'W	120,0	14,5	8,3	45°41,1'N; 167°27,3'W	119,7	14,9	8,0
18	48°21,4'N; 170°22,6'W	120,0	14,1	8,5	45°41,4'N; 170°18,7'W	119,7	14,2	8,4
19	48°17,1'N; 173°23,0'W	120,0	14,3	8,4	45°37,3'N; 173°09,9'W	121,5	14,8	8,2
20	48°08,0'N; 176°22,6'W	120,0	14,3	8,4	45°48,6'N; 176°03,1'W	119,8	14,4	8,3
21	47°54,3'N; 179°20,8'W	120,0	14,4	8,4	45°35,6'N; 178°53,6'W	121,6	14,9	8,1
22	47°36,1'N; 177°42,8'E	120,0	14,8	8,1	45°37,8'N; 178°12,6'E	119,9	15,1	8,0
23	47°13,4'N; 174°48,6'E	120,0	14,9	8,0	45°16,0'N; 175°24,6'E	119,9	14,8	8,1
24	46°46,3'N; 171°57,2'E	120,0	14,8	8,1	44°49,9'N; 172°39,0'E	119,9	15,0	8,0
25	46°15,1'N; 169°08,8'E	120,0	14,6	8,2	44°19,8'N; 169°56,1'E	119,9	14,6	8,2
26	45°39,9'N; 166°23,8'E	120,0	14,5	8,3	43°45,8'N; 167°16,2'E	121,8	15,0	8,1
27	45°00,8'N; 163°42,4'E	120,0	14,8	8,1	43°26,8'N; 164°30,1'E	119,9	15,0	8,0
28	44°17,9'N; 161°04,8'E	120,0	14,5	8,2	42°45,1'N; 161°56,1'E	119,9	15,0	8,0
29	43°31,6'N; 158°31,2'E	120,0	14,7	8,2	41°59,9'N; 159°25,7'E	119,9	14,7	8,2
30	42°41,9'N; 156°01,5'E	120,0	14,8	8,1	41°11,5'N; 156°59,0'E	119,9	15,1	7,9
31	41°49,0'N; 153°36,0'E	120,0	14,6	8,2	40°19,9'N; 154°36,1'E	119,9	15,2	7,9
32	40°53,2'N; 151°14,4'E	120,0	14,3	8,4	39°25,3'N; 152°16,9'E	119,9	15,2	7,9
33	39°54,6'N; 148°56,9'E	120,0	15,2	7,9	38°28,0'N; 150°01,4'E	126,8	14,8	8,5
34	38°53,3'N; 146°43,4'E	120,0	15,5	7,8	38°02,1'N; 147°23,3'E	120,0	15,1	7,9
35	37°49,6'N; 144°33,7'E	120,0	13,7	8,7	36°59,1'N; 145°14,6'E	121,8	15,8	7,7
36	36°43,6'N; 142°27,8'E	120,0	12,7	9,4	36°10,4'N; 142°55,6'E	126,6	14,4	8,8
37	35°35,4'N; 140°25,5'E	25,5	15,0	1,7	35°35,4'N; 140°25,5'E	25,5	15,0	1,7
Итого		4465,5	14,3	311,2		4499,4	14,9	302,4

Как видно из результатов, несмотря на то, что оптимальный маршрут более 33,9 миль, время в пути меньше на 8,8 ч. Средняя скорость при следовании по оптимальному пути составила 14,9 уз, по ДБК — 14,3 уз. Для более тихоходных судов экономия времени еще более значительная. Так, для судна дедвейтом 10000 т и скоростью 10 уз на том же переходе при тех же погодных условиях экономия времени составляет 29,6 ч. Столь значительная экономия времени возникла из-за сильных встречных ветров во второй половине пути при следовании по ДБК. Так, обратный маршрут Токио – Сан-Франциско при тех же погодных условиях позволяет сэкономить лишь около 5 ч при увеличении маршрута на 30 миль.

Следует отметить, что задачей моделирования являлась проверка принципиальной применимости алгоритма А\* для поиска оптимального пути с учетом гидрометеорологических факторов. Поэтому реальные гидрометеорологические данные были взяты за один день. Понятно, что в реаль-

ных условиях необходимы как текущие, так и прогностические данные по маршруту перехода. Указанные сервисы позволяют получить такие данные с прогнозом на 10 дней с обновлением через 6 ч. Алгоритм  $A^*$  позволяет также обходить препятствия [6], [10]. Для этого необходимо узлы графа в области препятствий пометить как запретные, не учитывая их при нахождении оптимального пути.

### Обсуждение (Discussion)

Анализ полученных результатов показывает, что использование алгоритма  $A^*$  по затраченному времени позволяют найти оптимальный маршрут с экономией времени по сравнению с кратчайшим путем, однако предлагаемая модель имеет ряд ограничений:

Используемая формула П. М. Хохлова для определения ветро-волновых потерь скорости судов подходит для судов водоизмещением 5000–25000 т и скоростью 9–20 уз. Для лучшего результата и снятия ограничений можно воспользоваться формулой В. В. Дремлюга [9].

Для получения оптимального пути в реальных условиях необходимо использовать как текущие, так и прогностические данные с интерполяцией по времени и координатам.

Кроме потерь скорости судна, необходимо также учитывать безопасность судна при неблагоприятных погодных условиях. В работе такими условиями являются скорость ветра более 25 м/с и волнение более 5 м. Районы с такими пороговыми значениями ветра и волнения судну следует избегать. Необходимо также учитывать потерю остойчивости на попутном волнении и опасность слеминга.

### Заключение (Conclusion)

Выбор оптимального пути является одной из важнейших оперативных мер по обеспечению безопасной и эффективной навигации. Соответственно метеорологическая маршрутизация может способствовать повышению энергоэффективности, сокращению выбросов и экономии затрат на маршруте.

Целью данного исследования являлась разработка системы метеорологической маршрутизации для плавания судна на основе алгоритма  $A^*$ . Функция стоимости алгоритма была дополнительно изменена для учета океанических и атмосферных условий вокруг судна. Функция исключения неблагоприятных узлов из поиска также была включена в систему путем установления пороговых значений ветра и волнения. Кроме нахождения оптимального по времени маршрута, алгоритм также показал возможность обхода препятствий.

Недорогая эвристика алгоритма  $A^*$  использовалась для сокращения времени вычислений при поиске оптимального маршрута, и было подтверждено, что условия приемлемости и оптимальности полученного оптимального маршрута выполняются.

Алгоритм  $A^*$  является не только одним из самых быстрых алгоритмов поиска оптимального пути, но и достаточно гибким [2]. В данном исследовании в качестве целевой функции принималось кратчайшее время перехода судна, которое в дальнейшем можно адаптировать к минимизации расхода топлива на переходе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веремей Е. И.* Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий / Е. И. Веремей, М. В. Сотникова // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — Т. 4. — № 3. — С. 55–61. — EDN VOQQT D.
2. *Чабак А. А.* Обзор актуальных алгоритмов по оптимизации маршрутов автономных судов / А. А. Чабак // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 259–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270. — EDN BSTKWV.
3. *Chen G.* Research on Ship Meteorological Route Based on A-Star Algorithm / G. Chen, T. Wu, Z. Zhou // Mathematical Problems in Engineering. — 2021. — Vol. 2021. — Is. 1. — Pp. 9989731. DOI: 10.1155/2021/9989731.
4. *Walther L.* Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing / L. Walther, A. Rizvanolli, M. Wendebourg, C. Jahn // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 31–45. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.004.

5. Perera L. P. Weather routing and safe ship handling in the future of shipping / L. P. Perera, C. G. Soares // *Ocean Engineering*. — 2017. — Vol. 130. — Pp. 684–695. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.09.007.
6. Goldberg A. V. Computing the shortest path: A search meets graph theory / A. V. Goldberg, C. Harrelson // *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms* — Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. — Pp. 156–165.
7. OpenGribs [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://opengribs.org> (дата обращения: 29.07.2024).
8. Ocean Surface Current Analyses Real-time (OSCAR) Surface Currents [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://podaac.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 29.07.2024).
9. Бояринов А. М. Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов / А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174. — EDN YLUEZI.
10. Shin Y. W. Near-Optimal Weather Routing by Using Improved A\* Algorithm / Y. W. Shin, M. Abebe, Y. Noh, S. Lee, I. Lee, D. Kim, J. Bae, K. C. Kim // *Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 10. — Is. 17. DOI: 10.3390/app10176010.

## REFERENCES

1. Veremey, E. I. and M. V. Sotnikova. “Optimal routing based on weather forecast.” *International Journal of Open Information Technologies* 4.3 (2016): 55–61.
2. Chabak, A. A. “Overview of current algorithms for autonomous vessels route optimization.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 259–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270.
3. Chen, G., T. Wu and Z. Zhou. “Research on Ship Meteorological Route Based on A-Star Algorithm.” *Mathematical Problems in Engineering* 2021.1 (2021): 9989731. DOI: 10.1155/2021/9989731.
4. Walther, L., A. Rizvanolli, M. Wendebourg and C. Jahn. “Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 4 (2016): 31–45. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.004.
5. Perera, L. P. and C. G. Soares. “Weather routing and safe ship handling in the future of shipping.” *Ocean Engineering* 130 (2017): 684–695. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.09.007.
6. Goldberg, A. V. and C. Harrelson. “Computing the shortest path: A search meets graph theory.” *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms* Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005: 156–165.
7. OpenGribs Web. 29 July 2024 <<https://opengribs.org> (дата обращения: 29.07.2024)>.
8. Ocean Surface Current Analyses Real-time (OSCAR) Surface Currents Web. 29 July 2024 <<https://podaac.jpl.nasa.gov>>.
9. Boyarinov, A. M., A. A. Ershov and S. M. Pylaev. “Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.
10. Shin, Y. W., K. C. Kim, et al. “Near-Optimal Weather Routing by Using Improved A\* Algorithm.” *Applied Sciences* 10.17 (2020). DOI: 10.3390/app10176010.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Оловянный Аркадий Львович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»  
690003, Российская Федерация,  
г. Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, 50а  
E-mail: [ark@msun.ru](mailto:ark@msun.ru), [arkolovyan@gmail.com](mailto:arkolovyan@gmail.com)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Olovyannikov, Arkadiy L.** —  
PhD of Technical Sciences, associate professor  
Maritime State University named  
after admiral G. I. Nevelskoy  
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok,  
690003 Russian Federation  
e-mail: [ark@msun.ru](mailto:ark@msun.ru), [arkolovyan@gmail.com](mailto:arkolovyan@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 04 апреля 2025 г.  
Received: Apr. 4, 2025.

## DERIVATION OF THE ANALYTICAL EXPRESSION FOR THE COMPLEXITY OF CONTAINER RETRIEVAL FROM A STACK

**A. L. Kuznetsov<sup>1</sup>, A. I. Karol<sup>2</sup>, A. A. Radchenko<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> FSEI HE «Saint Petersburg State University», St. Petersburg, Russian Federation

*A container terminal warehouse complex is a sophisticated system that performs the functions of servicing container flows passing through it. At large terminals, tens or even hundreds of thousands of containers are stored at any given time in multi-tiered stacks to minimize the extremely limited area of the port territory. This necessary storage approach increases the labour intensity of container retrieval operations for loading onto ships or adjacent transport vehicles. Increasing stack height complicates the procedure by blocking target containers with other containers, requiring these to be moved to gain access. This leads to an increase in the number of additional movements per commercial (i. e., customer-paid) movement to retrieve the target container. Consequently, productivity decreases and operational costs increase. In particular, an increase in auxiliary movements reduces container selectivity — defined as the ratio of commercial movements to the total number of movements — and increases labour intensity, defined as its inverse. The values of selectivity and labour intensity largely depend on the type of technological equipment used and storage organisation schemes. To assess the operational characteristics of designed port warehouse complexes and determine the necessary fleet size of technological equipment, it is necessary to develop quantitative metrics that allow estimation of the labour intensity of warehousing operations under different transport and technological schemes. Within this study, the authors have derived analytical expressions for all classes of warehousing equipment in the form of combinatorial formulas, which can serve as objective and easily computable metrics. The use of these metrics enables more accurate calculations at the technological design, planning, and management stages of container terminals. Thus, more accurate forecasting of operational indicators is thereby achieved, taking into account the specifics of the technologies and organisational solutions used.*

*Keywords: container terminal, warehouse, labour intensity of operations, transport-technological scheme, assessment of selectivity.*

**For citation:**

Kuznetsov, Alexander L., A. I. Karol and A. A. Radchenko “Derivation of the analytical expression for the complexity of container retrieval from a stack.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025):425–434. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-425-434.

**УДК 656.615**

## ВЫВОД АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТРУДОЕМКОСТИ ОПЕРАЦИЙ ПО ВЫБОРКЕ КОНТЕЙНЕРОВ ИЗ ШТАБЕЛЯ

**А. Л. Кузнецов<sup>1</sup>, А. И. Кароль<sup>2</sup>, А. А. Радченко<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В работе выполнено исследование складского комплекса контейнерного терминала, представляющего собой сложную систему, выполняющую функции обслуживания проходящих через него потоков. Отмечается, что хранение на крупных терминалах, где постоянно находятся десятки и даже порой сотни тысяч контейнеров, осуществляется в многоярусных штабелях для минимизации крайне дефицитной площади портовой территории. Такой вынужденный подход к складированию ведет к увеличению трудоемкости операций по выборке контейнеров из штабелей для погрузки на судно или на подвижной состав смежного транспорта. Подчеркивается, что рост высоты штабеля усложняет соответствующую процедуру вследствие блокировки целевых контейнеров другими контейнерами, что вынуждает перемещать последние*

для освобождения к ним доступа. Это приводит к увеличению количества дополнительных перемещений при выполнении одного коммерческого (оплачиваемого клиентом) движения по выборке целевого контейнера и соответственно к снижению производительности и росту себестоимости операций. В частности, отмечается, что увеличение числа вспомогательных перемещений снижает селективность контейнеров, определяемую отношением числа «коммерческих» перемещений к общему их числу и повышает трудоемкость, определяемую обратной к ней величиной. Получены аналитические выражения для всех классов складировочного оборудования в виде комбинаторных зависимостей, которые могут служить требуемыми объективными и просто вычисляемыми метриками. Использование этих метрик обеспечивает возможность выполнения более точных расчетов на стадии технологического проектирования, планирования и управления контейнерами терминалами. Тем самым достигается возможность более точного прогнозирования эксплуатационных показателей, учитывающих специфику используемых технологий и организационных решений.

*Ключевые слова:* контейнерный терминал, склад, трудоемкость операций, транспортно-технологическая схема, оценка селективности.

**Для цитирования:**

Кузнецов А. Л. Вывод аналитической зависимости трудоемкости операций по выборке контейнеров из штабеля / А. Л. Кузнецов, А. И. Кароль, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 425–434. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-425-434. — EDN SIJDWX.

### Введение (Introduction)

Технологическое оборудование, работающее на складе контейнерного терминала, разделяется на два крупных класса: машины с верхним доступом, к которому относятся складские перегружатели на рельсовом ходу (rail mounted gantry (RMG)), на пневмоходу (rubber tyred gantry (RTG)), автоконтейнеровозы (straddle carrier (SC)), и машины с боковым доступом, к которым относятся фронтальные погрузчики (front loaders, front loader truck (FLT)), штабелеры порожних контейнеров (empty container handlers ((ECH) и ричстакеры (reachstacker (RS)) [1], [2]. Машины первой группы являются наиболее производительными и эффективными, а потому используются на наиболее крупных современных терминалах [3]–[5]. Фронтальные погрузчики практически исчезают из практики работы, штабелеры используются исключительно для работы с порожними контейнерами [6]–[8]. Единственным значимым конкурентом из группы с боковым доступом остается ричстакер, обеспечивающий высокую операционную гибкость и универсальность [5]–[11].

Основным эксплуатационным различием между ричстакером и машинами с верхним доступом является трудоемкость операций по формированию и разборке штабеля контейнеров. Все они работают со штабелем в форме параллелепипеда, укладывая контейнеры в ряды, ярусы и секции. Все перегружатели имеют доступ к каждому столбцу над наземными ячейками (слотами) штабеля. Как следствие, они могут выбрать любой контейнер, находящийся в верхнем ярусе, за одно движение. Контейнер, находящийся во втором сверху ярусе, требует двух движений: перемещения блокирующего и выборки целевого. Самый нижний контейнер в столбце потребует  $h$  движений, где  $h$  есть высота штабеля.

Таким образом, общее число движений при работе над вертикальным столбцом высотой  $h$  составит  $N = 1 + 2 + \dots + h = \frac{(h+1)}{2}h$  движений, а среднее число движений на один контейнер —  $n = \frac{N}{h} = \frac{(h+1)}{2}$ . Это простое выражение, которое является справедливым для всех машин с верхним доступом, часто используется в теоретических и практических расчетах, связанных с технологически проектированием терминалов [6]–[9].

Ричстакер, доступ к которому к целевому контейнеру могут блокировать находящиеся в ближних рядах другие контейнеры, должен выполнять значительно большую работу по их перемещению. Это представляется достаточно очевидным и интуитивно объяснимым, однако количественная оценка этого эффекта в литературе отсутствует [2]–[9]. В данном исследовании предлагается аналитический вывод формулы, позволяющей выполнять объективную оценку этого важнейшего параметра.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Допустим, существует штабель шириной  $w$  рядов и высотой  $h$  ярусов, предназначенный для работы ричстакера. Рассмотрим отдельную секцию этого штабеля. Для определенности предположим, что доступ к ней осуществляется с одной стороны, например, слева. (Противоположная зеркально симметричная часть будет иметь доступ справа, и ее обслуживание будет подчиняться тем же законам). Очевидно, что верхний контейнер крайнего левого столбца будет выбран за одно движение, второй — за два и т. д. Таким образом, обработка крайнего столбца не отличается по трудоемкости от выборки машинами с верхним доступом.

Нахождение целевого контейнера во втором столбце вызывает необходимость удаления блокирующих доступ к нему контейнеров, число которых зависит от «глубины залегания» целевого контейнера (рис. 1). На этом рисунке красным цветом выделен целевой контейнер, желтым — перемещаемые контейнеры, белым — не подвергающиеся перемещению контейнеры, синим цветом отмечены целиком удаляемые столбцы, блокирующие доступ к рабочим зонам.

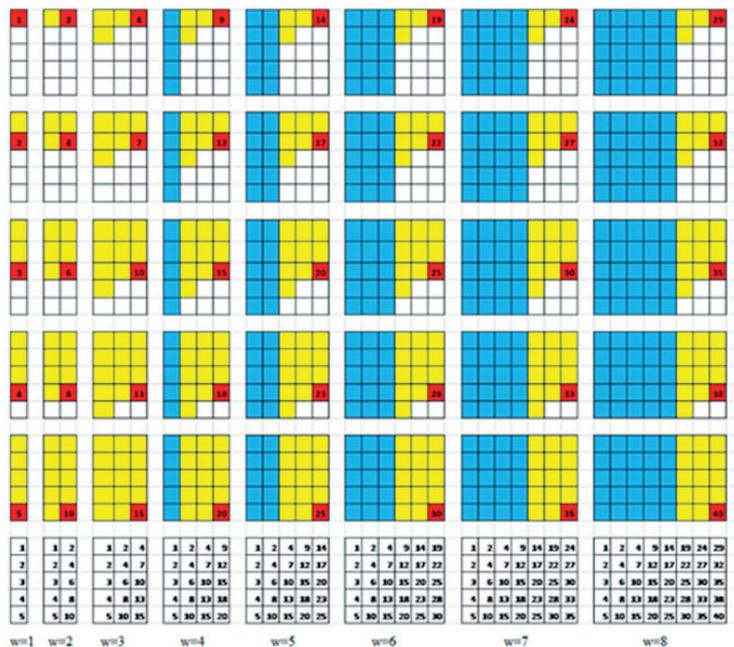


Рис. 1. Трудоемкость выборки контейнера из секции штабеля

Обозначив через  $N_k, 1 \leq k \leq w$  количество движений, необходимых для выборки всех элементов столбца с номером  $k$ , через  $N(h, w)$  — общее количество движений для обработки элементов  $w$  столбцов, запишем:

$$N(h, w) = N_1 + N_2 + \dots + N_w. \quad (1)$$

Среднее количество движений, необходимых для выборки произвольного контейнера, обозначим через  $n(h, w)$ :

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw}. \quad (2)$$

Как видно из рис. 3, количество движений, необходимых для выборки всех элементов первого столбца, составит

$$N_1 = 1 + 2 + \dots + h = \sum_{k=1}^h k = 1 \frac{h+1}{2} h. \quad (3)$$

При этом  $n(h, 1) = \frac{h+1}{2}$ .

Количество движений, необходимых для выборки элементов второго столбца, вдвое больше. Таким образом,

$$N_2 = 2 \frac{h+1}{2} h;$$

$$N(h, 2) = 3 \frac{h+1}{2} h;$$

$$n(h, 2) = \frac{3(h+1)}{4}. \quad (4)$$

Для выборки  $k$  элемента третьего столбца необходимо (при  $k < h$ ) дополнительно снимать  $k + 1$  элемент первого столбца. Тогда можно записать:

$$N_3 = 3(1 + 2 + \dots + h) + h - 1 = 3 \frac{(h+1)}{2} h + h - 1;$$

$$N(h, 3) = 3h(h+1) + h - 1;$$

$$n(h, 3) = h + \frac{4}{3} - \frac{1}{3h}.$$

Для  $w \leq 3$  зависимость  $n(w)$  можно записать в виде следующей формулы:

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw} = \frac{(h+1)(w+1)}{4} + \frac{1}{2} \frac{(w-1)(w-2)(h-1)}{hw}. \quad (5)$$

Для строки  $m$  ( $m < h$ ) столбца  $k$  ( $k > 3$ ) необходимо предварительно разобрать  $(k-3)$  столбца, что потребует  $(k-3)h$  движений. При этом такое же количество движений необходимо для каждого элемента столбца, и, таким образом,

$$N_k = N_3 + (k-3)h^2.$$

Теперь

$$N(h, w) = (N_1 + N_2 + N_3) + (N_4 + \dots + N_w). \quad (6)$$

Ранее полученная сумма в первых скобках составила  $N(h, 3) = 3h(h+1) + h - 1$ . Вычислим сумму во вторых скобках формулы (6):

$$(N_4 + \dots + N_w) = N_3(w-3) + \sum_{k=4}^w (k-3)h^2 =$$

$$= N_3(w-3) + \frac{1}{2}(w-3)(w-2)h^2, \quad (7)$$

откуда окончательно получим

$$N(h, w) = (N_1 + N_2 + N_3) + (N_4 + \dots + N_w) = N(h, 3) + N_3(w-3) + \frac{1}{2}(w-3)(w-2)h^2 =$$

$$= 3h(h+1) + h - 1 + \left( 3 \frac{(h+1)}{2} h + h - 1 \right) (w-3) + \frac{1}{2}(w-3)(w-2)h^2. \quad (8)$$

Соответственно среднее количество движений для  $w > 3$  составит

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw} =$$

$$= \frac{1}{2} h(w-3) \left( 1 - \frac{2}{w} \right) + \frac{3}{2} (h+1) \left( 1 - \frac{1}{w} \right) + \left( 1 - \frac{1}{h} \right) \left( 1 - \frac{2}{w} \right). \quad (9)$$

В качестве побочного результата следует отметить, что если для выборки контейнеров используется фронтальный погрузчик, к которому относится штабелер, то первый ряд контейнеров выбирается за те же  $N_1 = \frac{(h+1)h}{2}$ . Для второго и всех последующих рядов необходимо полностью убрать блокирующие  $(w-1)$  рядов, в которых находится  $(w-1)h$  контейнеров, после чего выполнить те же  $N_1$  операций. Таким образом, для этого подтипа машин с боковым доступом общее количество движений для разбора ряда  $w$  составит

$$N(h, w) = \sum_{k=1}^w [(k-1)h^2 + N_1] = \frac{(h+1)hw}{2} + \frac{(w-1)wh^2}{2} = \frac{h^2w + hw + h^2w^2 - h^2w}{2} = \frac{hw + h^2w^2}{2} = \frac{hw(hw+1)}{2} \quad (10)$$

и, соответственно, среднее количество движений

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw} = \frac{(hw+1)}{2}. \quad (11)$$

На рис. 2, а приведено семейство кривых  $n(w) = F(w, *)$ , где в качестве параметра фигурирует высота штабеля.

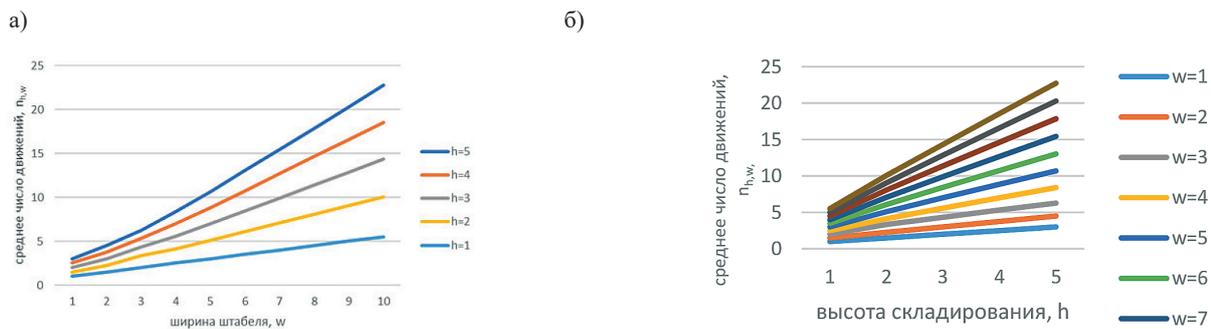


Рис. 2. Трудоемкость выборки как функция:  
а — ширины и высоты штабеля под RS; б — высоты и ширины штабеля под RS

На рис. 2, б то же семейство кривых изображено как функция от высоты складирования:  $n(h) = F(*, h)$  с шириной штабеля в качестве параметра.

Поскольку для значения  $w = 1$  график совпадает с оценкой для машин с верхним доступом, это значение можно использовать в качестве базового для сравнения. На рис. 3 полученная функция  $n(h, w) = F(w, h)$  представлена в виде поверхности.

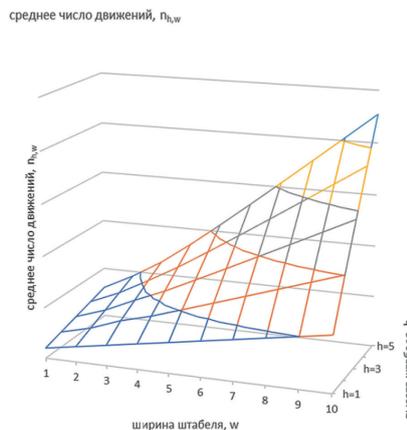


Рис. 3. Трудоемкость выборки  
 $n(h, w) = F(w, h)$

Результатом проведенного исследования являются формулы для оценки трудоемкости операций при всех существующих схемах складирования контейнеров.

### Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Как видно из рис. 4, при типичной высоте штабеля в 5–6 ярусов, средняя трудоемкость выборки машинами с верхним доступом составляет чуть более трех движений. При той же высоте складирования и типичной ширине штабеля трудоемкость операции выборки для ричстакера составляет уже 16–17 движений. При этом необходимо отметить, что машины с верхним доступом обычно выполняют перемещение блокирующих контейнеров в пределах одной и той же секции, в то время как ричстакер вынужден выполнять сложные маневры, перемещая контейнеры в соседние секции, что увеличивает не только количество движений, но и их длительность.

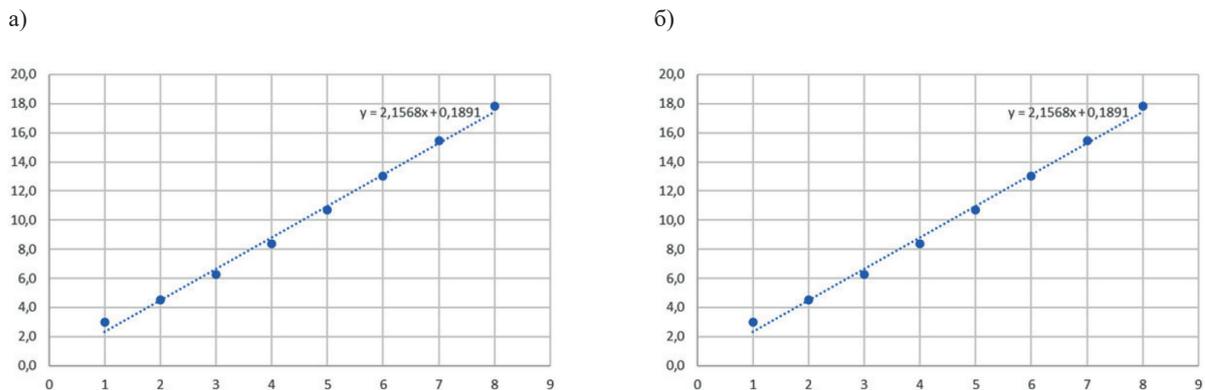


Рис. 4. Пример аппроксимации полученных зависимостей:  
а — линейная; б — квадратичная

Полученные формулы (10), (11) являются точными аналитическими зависимостями, однако их использование на практике может оказаться неудобным вследствие громоздкости. С приемлемой для практики точности можно выполнить аппроксимацию полученных зависимостей, линейную или полиномиальную. При этом можно выполнить подобные действия или подобное как для двух отдельных участков, так и для всей кривой. На рис. 4 приведены соответствующие результаты для штабеля высотой  $h = 5$ .

Если принять приближенную формулу для первых трех элементов в виде  $n(h, w) \approx \frac{(w+1)(h+1)}{4}$ , то для этого случая  $n(h, w) = \frac{(w+1)(h+1)}{4} = \frac{(w+1)(5+1)}{4} = 1,5w + 1,5$ , что близко к аппроксимированному значению  $n(h, w) = 1,6w + 1,3$  (рис. 4, а). Из рис. 4 видно, что для данной высоты складирования в качестве простейшего приближения всей кривой может быть использована формула  $n(h, w) = 2,16w + 0,19$ . Наконец, можно построить аппроксимирующую плоскость для полученной зависимости  $n(h, w) = F(w, h)$ . В такой постановке необходимо определить коэффициенты  $A, B, C$  линейной аппроксимирующей функции для множества значений  $n_i$ :

$$U(h, w) = Ah + Bw + C, \quad (12)$$

минимизирующие невязку на множестве значений  $n_i$ :

$$\sigma(A, B, C) = \sum_i (Ah_i + Aw_i + C - n_i)^2. \quad (13)$$

Функция невязки зависит от трех переменных  $A, B, C$ . Необходимые условия минимума этой функции определяются равенством нулю частных производных по каждой из этих переменных:

$$\frac{d}{dA} \sigma(A, B, C) = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dB} \sigma(A, B, C) &= 0; \\ \frac{d}{dC} \sigma(A, B, C) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Это приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i)h_i &= 0; \\ \sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i)w_i &= 0; \\ \sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i) &= 0 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \sum_i (Ah_i^2 + Bw_ih_i + Ch_i) &= \sum_i n_i h_i; \\ \sum_i (Ah_iw_i + Aw_i^2 + Cw_i) &= \sum_i n_i w_i; \\ \sum_i (Ah_i + Bw_i + C) &= \sum_i n_i \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} A\sum_i h_i^2 + B\sum_i w_ih_i + C\sum_i h_i &= \sum_i n_i h_i; \\ A\sum_i w_ih_i + B\sum_i w_i^2 + C\sum_i w_i &= \sum_i n_i w_i; \\ A\sum_i h_i + B\sum_i w_i + C\sum_i 1 &= \sum_i n_i. \end{aligned} \quad (15)$$

Решение полученной системы уравнений дает значения коэффициентов для искомой аппроксимирующей плоскости:

$$U(h, w) = 2,2h + 1,4w - 6,5.$$

Соответствующая поверхность представлена на рис. 5.

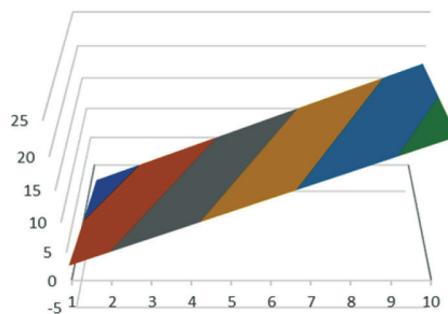


Рис. 5. Линейная аппроксимация полученных результатов

В то же время аппроксимация с помощью эмпирической зависимости:

$$n(w, h) = \frac{(w+1)(h+1)}{4}, \quad (16)$$

на всем пространстве задания переменных оказывается существенно более точной (рис. 6).

а)

б)

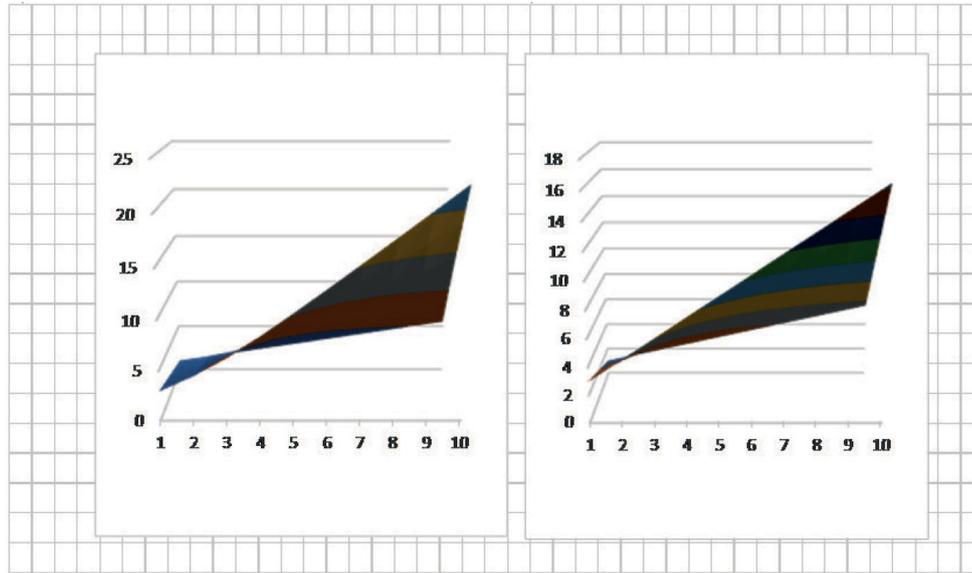


Рис. 6. Полученные результаты:  
а — аналитическая зависимость; б — эмпирическая аппроксимация

Это, скорее всего, объясняется тем, что математическая природа комбинаторных зависимостей, проявляющаяся в виде появления полиномиальных членов, делает линейную аппроксимацию принципиально неточной.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выведена точная аналитическая зависимость трудоемкости выборки контейнеров из штабеля машинами с различным доступом к штабелю, которая сводится к комбинаторной схеме выборки с возвращением:

– для машин с верхним это  $n(w, h) = \frac{(h+1)}{2}$ ;

– для фронтального погрузчика это  $n(w, h) = \frac{(hw+1)}{2}$ ;

– для ричтстакера выведенная точная зависимость  $n(h, w)$  описывается сложным аналитическим выражением, неудобным для практики.

2. Поскольку комбинаторная схема, использованная для теоретического вывода, является абстракцией, в исследовании была определена задача нахождения «инженерного» приближения полученной зависимости.

3. Показано, что решением является эмпирическая оценка среднего числа движений

$$n(w, h) \approx \frac{(h+1)(w+1)}{4}.$$

4. Использование полученных оценок позволяет объективно сравнивать эксплуатационные характеристики операций по выборке контейнеров из штабеля машинами с верхним и боковым доступом, что было бы невозможно без полученных результатов.

5. Полученные эмпирические зависимости могут использоваться в технологическом проектировании контейнерных терминалов различного назначения с целью оценки численности парка складировующего оборудования и при проведении сравнительных экономических расчетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Морские контейнерные перевозки: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков, А. Д. Семенов. — М.: ООО «МОРКНИГА», 2019. — 413 с. — EDN FPZHLX.
2. Шаржуков И. О. Устойчивое развитие складской логистики с применением аналитики и моделирования для оптимизации процессов хранения / И. О. Шаржуков, Г. А. Некоз, Д. А. Сафаров, А. Н. Норкина // Финансовая безопасность — новые горизонты: Материалы X Международной научно-практической конференции Международного сетевого института в сфере ПОД/ФТ, Москва, 19–20 ноября 2024 года. — М.: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2024. — С. 1052–1061. — EDN LCDRCR.
3. 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.
4. Кузнецов А. Л. Математическое описание задачи анализа пропускной способности морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Р. В. Кузнецов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335. — EDN SBKQUN.
5. Кузнецов А. Л. Аналитическое уточнение метода статистических испытаний для исследования морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914. — EDN CSBMQL.
6. Güven, C. Modelling and optimisation of online container stacking with operational constraints / C. Güven, D. T. Eliiyi // Maritime Policy & Management. — 2019. — Vol. 46. — Is. 2. — Pp. 201–216. DOI: 10.1080/03088839.2018.1450529.
7. Scholl J. On the quality of simple measures predicting block relocations in container yards / J. Scholl, D. Boywitz, N. B. and // International Journal of Production Research. — 2018. — Vol. 56. — Is. 1–2. — Pp. 60–71. DOI: 10.1080/00207543.2017.1394595.
8. Watanabe I. Container Terminal Planning: A Theoretical Approach / I. Watanabe. — World Cargo News, 2001. — 245 p.
9. Carten A. Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach / A. Carteni, S. Luca // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. Андреева Л. А. Задачи совершенствования методов технологического проектирования морских торговых портов в новых условиях / Л. А. Андреева, А. Л. Кузнецов, А. М. Сампиев, А. Д. Семенов // Транспортное дело России. — 2024. — № 1. — С. 164–166. — EDN CERHHD.
11. Tsao Y.-C. A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable sea-port-dry port network design under an uncertain environment / Y.-C. Tsao, V.-V. Thanh // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2019. — Vol. 124. — Pp. 13–39. DOI: 10.1016/j.tre.2019.02.006.

## REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov and A. D. Semenov. *Morskie konteynerynye perevozki: Monografiya* Moskva: ООО «MORKNIGA», 2019: 413.
2. Sharzhukov, I. O., G. A. Nekoz, D. A. Safarov and A. N. Norkina. “Sustainable development of warehouse logistics using analytics and modeling to optimize storage processes.” *Finansovaya bezopasnost' — novye gorizonty: Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Mezhdunarodnogo setevogo instituta v sfere POD/FT, Moskva, 19–20 noyabrya 2024 goda*. Moskva: Natsional'nyy issledovatel'skiy yadernyy universitet MIFI, 2024: 1052–1061.
3. 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.
4. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and R. V. Kuznetsov. “Mathematical description of the sea ports throughput assessment.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.

5. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Analytical improvement of the statistical experiments method for the purposes of ports design.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914.
6. Güven, C. and D. T. Eliyi. “Modelling and optimisation of online container stacking with operational constraints.” *Maritime Policy & Management* 46.2 (2019): 201–216. DOI: 10.1080/03088839.2018.1450529.
7. Scholl, J., D. Boywitz and N. B. and. “On the quality of simple measures predicting block relocations in container yards.” *International Journal of Production Research* 56.1–2 (2018): 60–71. DOI: 10.1080/00207543.2017.1394595.
8. Watanabe, I. *Container Terminal Planning: A Theoretical Approach* World Cargo News, 2001.
9. Carten, A. and S. . Luca. “Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach.” *Simulation Modelling Practice and Theory* 21.1 (2012): 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. Andreeva, L. A., A. L. Kuznetsov, A. M. Sampiev and A. D. Semenov. “Tasks of improving methods of technological design of trade sea ports in new conditions.” *Transport Business of Russia* 1 (2024): 164–166.
11. Tsao, Y.-C. and V.-V. Thanh. “A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 124 (2019): 13–39. DOI: 10.1016/j.tre.2019.02.006.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кузнецов Александр Львович** —  
д. т. н, профессор,  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru)

**Кароль Андрей Игоревич** —  
к. ф.-м.н, доцент  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет»,  
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Университетская наб., д. 7–9  
e-mail: [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

**Радченко Анна Александровна** —  
старший преподаватель,  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»,  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kuznetsov Alexander L.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor,  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya str, St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru)

**Karol Andrey I.** —  
PhD of Physical and Mathematical Sciences,  
associate professor,  
FSEI HE «Saint Petersburg State University»  
7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg, 199034,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

**Radchenko Anna A.** —  
Senior lecturer,  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya str, St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 28 марта 2025 г.  
Received: Mar. 28, 2025.

# ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-435-448

EDN SWATXX

## INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF CHROME ELECTROLYTIC COATINGS ON THEIR RESISTANCE AGAINST CAVITATION WEAR

**Y. N. Tsvetkov<sup>1</sup>, E. O. Gorbachenko<sup>2</sup>, A. D. Cheblokov<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup> — Joint Stock Company «KSZ», St. Petersburg, Russian Federation,

<sup>3</sup> — Joint Stock Company «Concern «Sea underwater weapon — Gidropribor»»,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Bright chromium electrolytic deposits are widely used on water transport to provide the wear resistance of the crucial equipment parts in particular to protect the water-cooled surface of ship diesel liners against the cavitation attack. There were seven bright chromium coatings tested. The coatings were deposited in different regimes and the surface of the coatings was subjected to different treatment. The coatings were distinguished from each other by thickness, microhardness and the character of cracks distribution. The chromium plating was carried out in standard electrolyte of the following composition (kg/m<sup>3</sup>): chrome anhydride — 250; sulphuric acid — 2,5; trivalent chrome — no more than 5; trivalent iron ions — no more than 10. The electrolyte was prepared on the distilled water of a single distillation. The chrome electrolytic coatings were obtained on the plates cut out of the used ship diesel liners made out of cast iron SCh21. The cavitation wear tests were carried out on a magnetostrictive vibratory rig in fresh water, the frequency and amplitude of vibration of the rig horn being equal to 22 kHz and 28 μm accordingly. The distance between the sample chrome surface and the horn butt amounted to 0,5 mm. The wear of the samples was evaluated by periodical weighing during the testing on an analytical balance with step-type indication equal to 0,1 mg. Along with the samples weighing, the roughness of their surface was measured before and during testing, the roughness was evaluated by the value of arithmetical mean deviation of the assessed profile. The coatings structure was investigated on their cross microsections using a metallurgical microscope before and after the test. Cavitation wear resistance of a chromium coating is determined by two factors: the character of the cracks in the coating and the coating thickness. The coating thickness affects the coating longevity under cavitation attack, and the cracks character affects both the coating longevity and the wear rate of the chromium coating. The density of the cracks emerging on a coating surface and the cracks breadth define the surface roughness, and the cavitation wear begins from the coatings spots adjacent to the cracks edges: there occurs the brittle breaking off of the particles from the coating by its destruction along the cracks already present in the original coating. So there has to be a dependence of the wear rate on the height parameter of the roughness: the dependence was established by results of the experiments. The existence of the dependence of the wear rate on the value of the arithmetical mean deviation of the assessed profile of initial coating surface allows one to draw a conclusion, that after chromium plating, liners surface is necessary to expose to grinding with a fine-grained tool and, if possible, to polishing. The chrome coating has to be dense, that is the broad extended cracks have to be absent in the coatings.*

*Keywords: chrome electrolytic coating, coating structure, ultrasonic magnetostrictive rig, cavitation wear, surface roughness.*

### **For citation:**

Tsvetkov, Yuriy N., E. O. Gorbachenko and A. D. Cheblokov “Influence of the structure of chrome electrolytic coatings on their resistance against cavitation wear.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 435–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-435-448.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ХРОМОВЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ КАВИТАЦИОННУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Ю. Н. Цветков<sup>1</sup>, Е. О. Горбаченко<sup>2</sup>, А. Д. Чеблоков<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация,

<sup>3</sup> — АО «Концерн «Морское подводное вооружение — Гидроприбор»», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование хромовых электролитических покрытий, широко применяемых на водном транспорте для повышения износостойкости деталей ответственного оборудования, в том числе для защиты водоохлаждаемых поверхностей втулок цилиндров судовых дизелей от кавитационного воздействия. В работе предпринята попытка связать шероховатость хромовых блестящих покрытий с характером распределения в них трещин и, как следствие, с кавитационной износостойкостью покрытий. Были испытаны семь покрытий из блестящего хрома, нанесенных при разных режимах и имеющих разную обработку поверхности, отличающихся друг от друга толщиной, микротвердостью и характером распределения трещин. Хромирование выполнялось в стандартном электролите — водном растворе хромового ангидрида и серной кислоты — следующего состава: хромовый ангидрид ( $\text{CrO}_3$ ) — 250 г/л; серная кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) — 2,5 г/л; содержание трехвалентного хрома — не более 5 г/л; содержание ионов трехвалентного железа — не более 10 г/л. Электролит готовился на дистиллированной воде однократной перегонки. Хром наносили на образцы из серого чугуна СЧ21, вырезанные из втулок цилиндров судового дизеля, бывших в эксплуатации. Испытания на кавитационный износ проводили в пресной воде при температуре воды  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  на ультразвуковом магнитоэстрикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора, равных примерно 22 кГц и 28 мкм соответственно. Расстояние между поверхностью испытываемого покрытия и торцом колеблющегося концентратора составляли равным 0,5 мм. В процессе испытаний образцы периодически взвешивали на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг, при этом наряду с потерями массы образцов оценивали шероховатость поверхности покрытий в очаге износа по значению среднего арифметического отклонения профиля. Структуру покрытия исследовали на металлографическом микроскопе на поперечных нетравленных шлифах до и после испытаний. Учитывали, что износостойкость хромовых электролитических покрытий при кавитации определяется двумя факторами: характером трещин в покрытии и толщиной покрытия, а также то, что толщина покрытия влияет на его долговечность, а характер трещин — как на долговечность, так и на скорость изнашивания хромового покрытия. Густота сетки трещин, выходящих на поверхность, и их ширина определяют шероховатость поверхности, а поскольку кавитационный износ начинается с районов покрытия, примыкающих к берегам трещины в начальный период кавитационного воздействия, происходит хрупкий откол частиц от покрытия путем его разрушения по уже имеющимся трещинам в исходном покрытии, должна проследиваться зависимость между скоростью изнашивания и высотным параметром шероховатости  $R_a$ , что подтверждается результатами экспериментов. Существование зависимости скорости изнашивания от среднего арифметического отклонения профиля исходной поверхности хромового покрытия позволяет сделать вывод о том, что поверхность втулок цилиндров после хромирования необходимо подвергать шлифованию мелкозернистым инструментом и по возможности полированию. При этом покрытие должно быть плотным, а именно не содержать большое количество широких протяженных трещин.

Ключевые слова: хромовое электролитическое покрытие, структура покрытия, трещины, ультразвуковой магнитоэстрикционный вибратор, кавитационное изнашивание, шероховатость поверхности.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Влияние структуры хромовых электролитических покрытий на их кавитационную износостойкость / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко, А. Д. Чеблоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 435–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-435-448. — EDN SWATXX.

### Введение (Introduction)

Кавитация воды в рубашках охлаждения между поверхностью втулок и блока цилиндров дизельных двигателей вследствие вибрации втулок при ударах поршней при их перекладке являет-

ся серьезной проблемой, с которой приходится сталкиваться при эксплуатации высокооборотных дизелей [1], [2]. Вибрационная кавитация приводит к кавитационному изнашиванию водоохлаждаемых поверхностей втулок цилиндров [3], [4] и противоположных поверхностей блока цилиндров. Втулки цилиндров чаще всего изготавливают из серого чугуна, реже — из азотируемых сталей. Чугун обладает замечательными трибологическими свойствами при работе на трение в паре с поршневыми кольцами, однако кавитационная износостойкость его чрезвычайно низкая. Кавитационная износостойкость стали существенно выше износостойкости чугуна, однако на стальных втулках очаги кавитационных разрушений появляются также часто, как и на чугунных.

Одним из способов повышения долговечности втулок цилиндров судовых дизелей в условиях кавитационного изнашивания является электролитическое хромирование водоохлаждаемой поверхности втулок<sup>1,2</sup>. Несмотря на серьезные недостатки технологии электролитического хромирования, указанные, в частности, в работах [5], [6], и внедрение новых более совершенных технологий повышения износостойкости водоохлаждаемой поверхности втулок [7], хромовые электролитические покрытия до сих пор применяются при изготовлении и ремонте втулок судовых дизелей. Внешний диаметр втулки цилиндра в ее водоохлаждаемой части не относится к сопрягаемым размерам, поэтому механическая обработка внешней поверхности втулок после ее хромирования с конструктивной точки зрения необязательна. В этой связи возникает вопрос о необходимости шлифования и полирования хромового покрытия, нанесенного на водоохлаждаемую поверхность.

Известно, что в зависимости от режима хромирования можно получить молочные блестящие и матовые покрытия. Максимальную износостойкость при кавитационном воздействии имеют блестящие хромовые покрытия, однако они всегда покрыты сеткой трещин вследствие больших остаточных напряжений в покрытии, возникающих при его формировании<sup>3</sup>. Распределение трещин и их характеристики зависят от многих факторов, включая режим хромирования и толщину покрытия [8], [9].

Очевидно, что трещины влияют на эксплуатационные свойства деталей с хромовыми электролитическими покрытиями, к примеру, на сопротивление циклическим нагрузкам [9], [10], износостойкость<sup>3</sup> и коэффициент трения [11] покрытий при трении скольжения. Вопрос износостойкости хромовых покрытий при трении исследован достаточно подробно, так как электролитический хром часто наносят на поверхность трения втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Известно, что гладкое хромовое покрытие обладает плохой смачиваемостью смазочными маслами, а микротрещины на поверхности хромового покрытия играют роль микропор. Поэтому сетка трещин способствует удержанию смазочного масла на поверхности хромового покрытия и кратному увеличению его износостойкости при трении в условиях граничной смазки [12]. Установлено<sup>3</sup>, что пористость хромового покрытия для поршневых колец дизелей должна быть в пределах 30–45 % [11].

При кавитационном воздействии влияние трещин на износостойкость хромового покрытия имеет принципиально иной характер по сравнению с их влиянием на износостойкость при трении скольжения. Так, например, в работе [13] показано, что трещины на поверхности хромовых электролитических покрытий являются очагами разрушения при кавитационном воздействии. Можно обоснованно полагать, что густота сетки трещин, а также длина и ширина их раскрытия будут оказывать влияние на шероховатость поверхности, а значит, можно попытаться связать шероховатость хромовых покрытий с их кавитационной износостойкостью, тем более, что с подобных позиций исследования кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий не проводились.

*Целью работы* является исследование влияния структуры и шероховатости хромового электролитического покрытия на его кавитационную износостойкость.

<sup>1</sup> Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования: монография / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.

<sup>2</sup> Фомин В. В. Гидроэрозия металлов: монография / В. В. Фомин. М.: Машиностроение, 1977. 287 с.

<sup>3</sup> Ларин Т. В. Повышение износостойкости втулок и поршневых колец тепловозных дизелей: монография / Т. В. Ларин, Б. М. Асташкевич. М.: Трансжелдориздат, 1957. 124 с.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты выполнялись на образцах, вырезанных из рабочих втулок цилиндров дизеля 6Ч(Н)СП 18/22. Материал втулки — чугун СЧ21. Заготовки для образцов вырезали вдоль оси втулки. Вырезанные полосы фрезеровали, чтобы получить полосу толщиной около 7 мм с двумя плоскими поверхностями. Хромовое покрытие осаждалось на фрезерованную поверхность чугуна.

Хромирование выполнялось в стандартном электролите — водном растворе хромового ангидрида и серной кислоты — следующего состава: хромовый ангидрид ( $\text{CrO}_3$ ) — 250 г/л, серная кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) — 2,5 г/л, содержание трехвалентного хрома не более 5 г/л, содержание ионов трехвалентного железа не более 10 г/л. Электролит готовился на дистиллированной воде однократной перегонки. Так как износостойкость покрытий определяется конкретными характеристиками и не зависит от того, на каких режимах хромирования получены требуемые характеристики покрытия, хромирование осуществляли анодно-струйным и стационарным методами при разных значениях температуры и плотности тока с последующим после хромирования анодным травлением (покрытия образцов 1–4) и без него (покрытия образцов 5, 6), чтобы получить покрытия разной толщины и пористости (см. таблицу). Следует обратить внимание на то, что покрытие образца 6 представлено двумя видами образцов, отличающихся разной обработкой после хромирования: образцы 6<sub>ш</sub> шлифовали на шкурке 320, а образцы 6<sub>п</sub> сначала шлифовали на шкурках 320, 500, 800, 1000 и 1200, а потом полировали на влажном сукне.

Структуру покрытия исследовали на поперечных нетравленных шлифах на металлографическом микроскопе. Технология подготовки шлифов рассмотрена в работе [14]. Шлифы покрытий готовили перед испытаниями для определения структуры покрытия в исходном состоянии и после испытаний на кавитационный износ. Шлифы анализировали с помощью металлографического микроскопа.

#### Характеристики образцов хромового электролитического покрытия

Номер образца	Метод хромирования	Средняя толщина покрытия, мкм	Параметр шероховатости $R_a$ , мкм	Микротвердость покрытия $H_{100}$ , МПа	Состояние поверхности покрытия
1	Стационарное + анодное травление	60	2,11	7593	Исходное, полученное при хромировании
2	Анодно-струйное + анодное травление	90	4,07	7133	То же
3	Анодно-струйное + анодное травление	160	1,91	5915	То же
4	Анодно-струйное + анодное травление	120	3,05	7411	То же
5	Анодно-струйное	70	0,605	6821	То же
6	6 <sub>ш</sub> Анодно-струйное	140	0,817	7340	Шлифованное после хромирования
	6 <sub>п</sub> Анодно-струйное	120	0,012	7340	Шлифованное и полированное после хромирования

<sup>1</sup> Микротвердость покрытий образцов 1–5 находили на поперечных шлифах покрытия, микротвердость покрытия образца 6 оценивали на полированной поверхности покрытия образца 6<sub>п</sub>.

Перед испытаниями делали снимки поверхности покрытия образцов на металлографическом микроскопе, измеряли шероховатость поверхности, определяли микротвердость покрытия и взвешивали образец на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг. Шероховатость оценивали по значению среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  на приборе шероховатости MahrSurf PS1. Длина оценки включала пять базовых длин, последнюю выставляли равной 0,8 мм. Измерения исходной шероховатости проводили трижды, за окончательный результат брали среднее арифметическое значение. Микротвердость покрытий измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор (пирамидку Виккерса), соответствующей массе грузика, равной 100 г.

Испытания образцов хромовых покрытий на кавитационный износ проводили на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе (МСВ) — рис. 1 — в отстоявшейся водопроводной воде г. Санкт-Петербурга. Температура воды в процессе испытаний поддерживалась в диапазоне  $20 \pm 3$  °С. Частота и амплитуда колебаний торца концентратора 4 вибратора составляла, соответственно, 22 кГц и 28 мкм. Расстояние между хромированной поверхностью образца 5 и торцом концентратора 4 выставляли равным 0,5 мм.

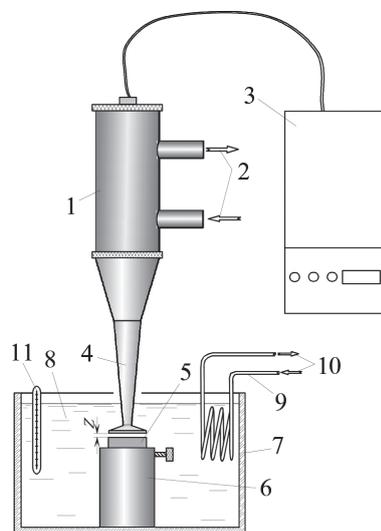


Рис. 1. Схема испытаний на магнитострикционном вибраторе:  
 1 — ультразвуковой излучатель; 2 и 10 — подвод охлаждающей воды;  
 3 — генератор ультразвуковых колебаний; 4 — концентратор колебаний; 5 — образец;  
 6 — державка образца; 7 — емкость с водой; 8 — вода;  
 9 — охлаждающий змеевик; 11 — термометр

Периодически во время испытаний установку выключали, образец вынимали из державки, сушили, фотографировали очаг износа, измеряли шероховатость, взвешивали и определял потери массы  $\Delta M$ . По результатам испытаний строили зависимости  $\Delta M$  и  $R_a$  от продолжительности кавитационного воздействия. После окончания испытания готовили поперечный шлиф образца и анализировали кавитационное разрушение хромового покрытия на металлографическом микроскопе.

### Результаты и их обсуждения (Results and Discussion)

На рис. 2 представлены фотографии исходной (до испытаний) поверхности хромового покрытия на образцах 1–5. Покрытия на образцах 6 перед испытаниями, соответственно, шлифовали (образец 6<sub>ш</sub>) или шлифовали и полировали (образец 6<sub>п</sub>). В результате обработки абразивными шкурками рисунок трещин на поверхности пропадает, так как они забиваются продуктами шлифования и полирования, и поверхность приобретает однородный зеркальный блеск. Однако после краткого кавитационного воздействия на МСВ рисунок трещин вновь проявляется на поверхности и по нему можно судить о пористости хромового покрытия в исходном (до испытания) состоянии, поэтому на рис. 2, е приведена фотография поверхности полированного покрытия на образце 6<sub>п</sub>

после 8-часового кавитационного воздействия, на основе которой можно судить о распределении трещин в исходном покрытии образца 6.

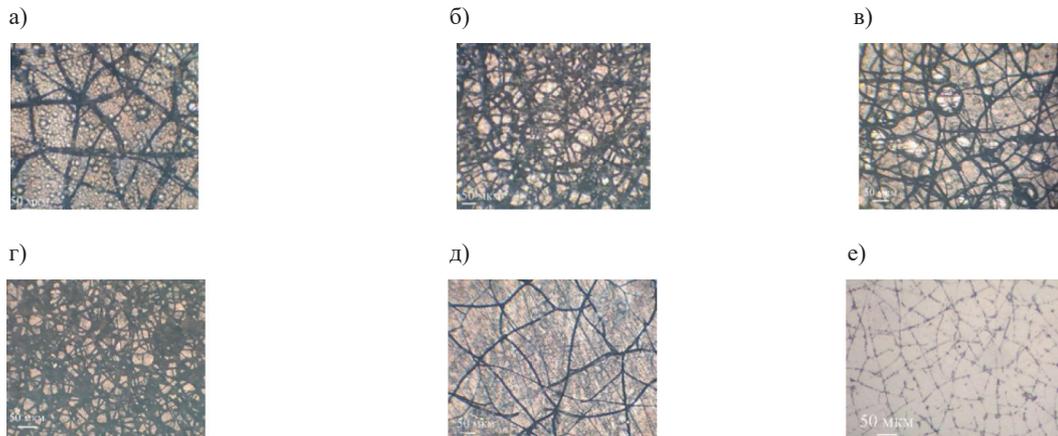


Рис. 2. Фотографии поверхности хромового покрытия в исходном состоянии:  
а — образец 1; б — образец 2; в — образец 3; г — образец 4; д — образец 5;  
е — образец 6<sub>п</sub> после 8-часового кавитационного воздействия на него

На рис. 3 показана структура хромовых покрытий в исходном (до испытания) состоянии на поперечных нетравленных шлифах. Как видно, покрытия существенно отличаются не только по толщине, но и по характеру и распределению трещин. Если покрытие образца 6 сравнительно плотное (см. рис. 3, е, ж), то покрытия на образцах 1–5 содержат большое количество трещин разной протяженности, причем, если сопоставлять фотографии на рис. 2 и 3, то можно отметить, что густой сетке соответствуют узкие короткие трещины и если такие трещины начинаются с поверхности, то проникают на небольшую глубину (см. рис. 3, б–г, е, ж), а редкой сетке — наоборот, широкие и глубокие (см. рис. 3, а, д), и в пределе такие трещины достигают чугунной подложки (см. рис. 3, а).

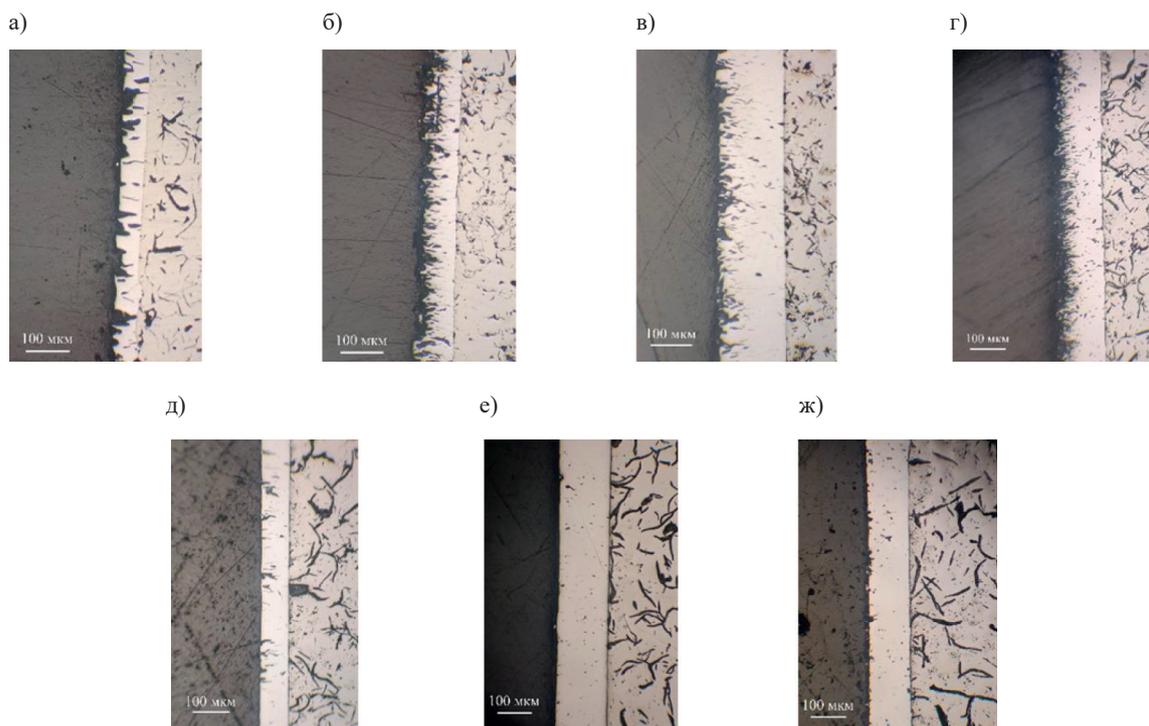


Рис. 3. Структура хромового покрытия:  
а — на образце 1; б — на образце 2; в — на образце 3; г — на образце 4;  
д — на образце 5; е, ж — на образцах, соответственно, 6<sub>ш</sub> и 6<sub>п</sub>

Известно, что кавитационное изнашивание металлических материалов характеризуется наличием инкубационного периода, т. е. начального отрезка времени, в течение которого потери материала с поверхности покрытия отсутствуют, идет процесс накопления повреждений в поверхностном слое. Сравнение построенных по результатам испытаний зависимостей потерь массы  $\Delta M$  от продолжительности  $t$  кавитационного воздействия  $\Delta M(t)$ , приведенных на рис. 4 и 5, показало, что скорость изнашивания испытанных покрытий находится в широком диапазоне и может отличаться для разных покрытий на два порядка, при этом износ всех покрытий начинается с первых секунд кавитационного воздействия. Причину такого поведения покрытий при кавитационном воздействии поможет раскрыть анализ зависимостей  $R_a(t)$ , представленных вместе с графиками  $\Delta M(t)$  на рис. 4 и 5, а также фотографий на рис. 6, на которых показан внешний вид испытанных образцов и поперечные сечения покрытий в очаге кавитационного износа.

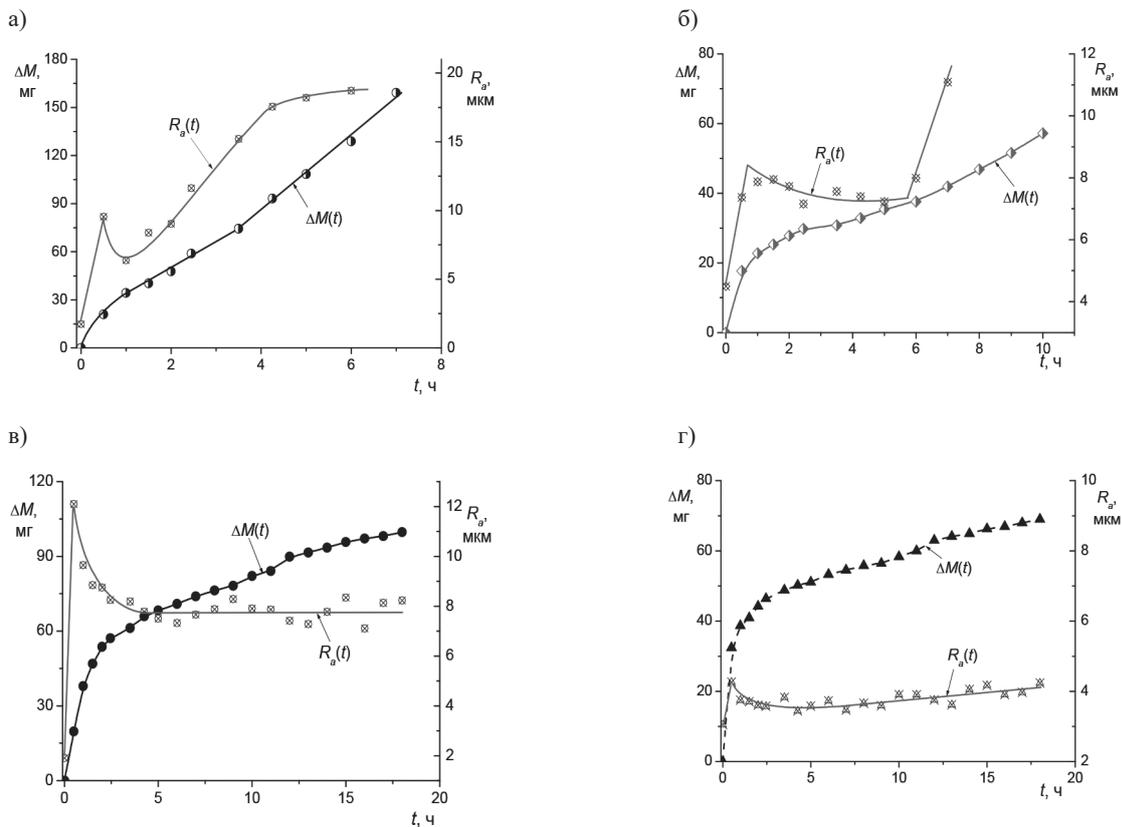


Рис. 4. Зависимости потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля от продолжительности кавитационного воздействия:  
 а — образец 1; б — образец 2; в — образец 3; г — образец 4

В работе [15] показано, что при кавитационном изнашивании металлических материалов зависимость  $R_a(t)$  имеет вид ломаной линии, т. е. в пределах инкубационного периода зависимость  $R_a(t)$  линейная, а окончанию инкубационного периода соответствует появление первой точки перелома. Это хорошо видно на графиках для покрытий образцов 5 и 6 (рис. 5): по точке перелома на зависимостях  $R_a(t)$  можно оценить продолжительность  $t_{и2}$  инкубационного периода. Результаты периодического измерения микротвердости покрытия  $b_{и}$  в течение времени  $t_{и2}$  показали наличие стадии упрочнения и разупрочнения [16], т. е. потери массы в инкубационный период на образцах покрытий  $b_{ш}$  и  $b_{п}$ , по всей видимости, не имеют ничего общего с кавитационной износостойкостью собственно хромового покрытия.

Характер изменения зависимости  $\Delta M(t)$  для покрытий образцов  $b_{ш}$  и  $b_{п}$  (см. рис. 5) в течение инкубационного периода имеет отличительные особенности, проявляющиеся вначале в увеличении потерь массы образцов, а затем в их уменьшении и прохождении через минимум. Причины

такого изменения потерь массы подробно описаны в статье [16] и, вероятнее всего, объясняются вымыванием частиц микрочастиц покрытия, образовавшихся при шлифовании покрытия, из трещин и попаданием воды в условиях ультразвукового кавитационного воздействия в микротрещины. Кроме того, предлагается корректировать кинетические кривые  $\Delta M(t)$  переносом оси абсцисс вверх так, чтобы она прошла через минимум (линия 1 на рис. 5, б) и тогда условную продолжительность инкубационного периода  $t_{и1}$  находить, согласно [17], по точке пересечения касательной 2 с новой осью абсцисс 1 (на рис. 5, в, линии 1 и 2 не обозначены). Видно, что значения  $t_{и1}$  и  $t_{и2}$  очень близки друг к другу. Это доказывает возможность использования *метода профилометрии* для оценки продолжительности инкубационного периода хромовых блестящих покрытий с низкой пористостью.

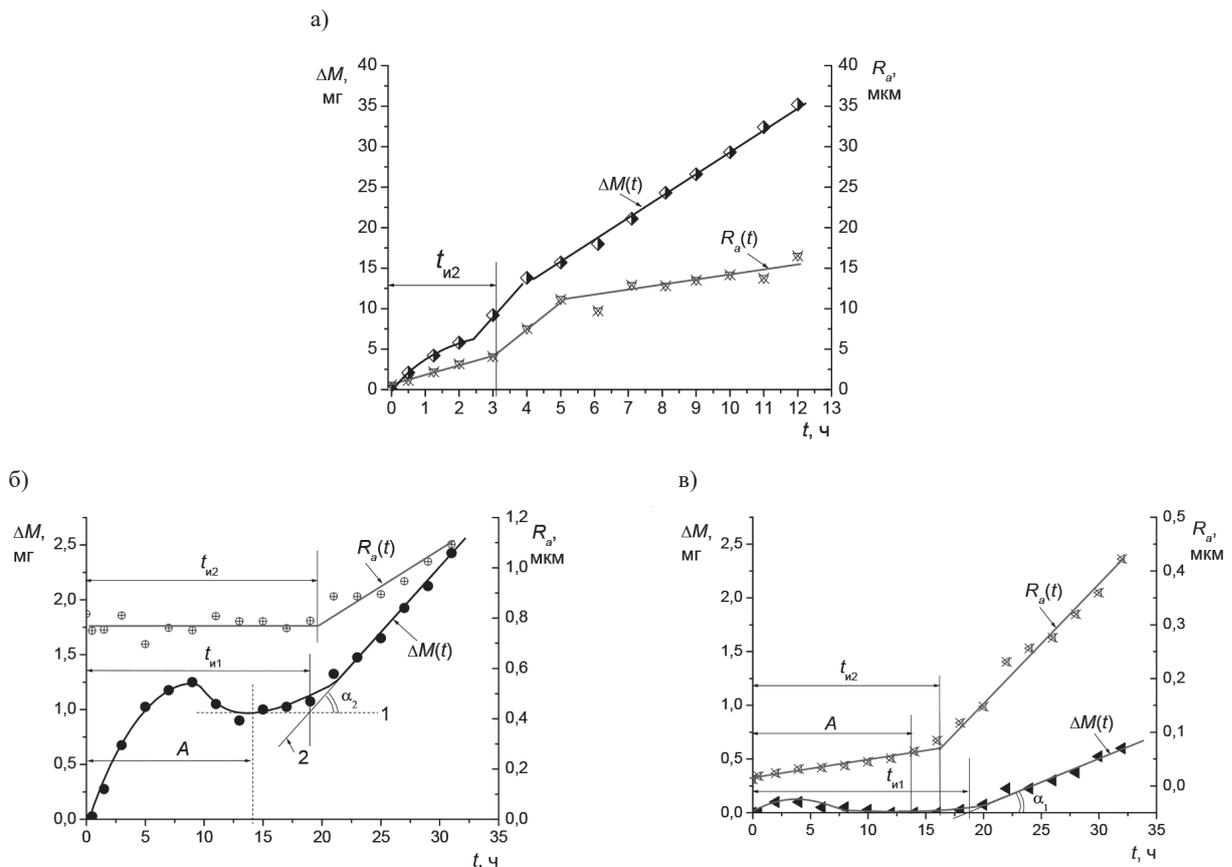


Рис. 5. Зависимость потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля образцов от продолжительности кавитационного воздействия:  
а — образец 5; б, в — соответственно образцы б<sub>ш</sub> и б<sub>п</sub>

Для покрытий образцов 1–4 (см. рис. 4) вид зависимостей  $R_a(t)$  принципиально отличается от вида графиков  $R_a(t)$  на рис. 5. Как видно из рис. 4, параметр  $R_a$  вначале резко увеличивается и проходит через максимум. Это объясняется тем, что в начальный период кавитационного воздействия происходит хрупкий откол частиц от покрытия путем его разрушения по уже имеющимся трещинам в исходном покрытии.

Для покрытий образцов 3 и 4 после прохождения максимума значение параметра  $R_a$  изменяется слабо и не превышает максимального значения, т. е. шероховатость покрытия после откола крупных частиц снижается. Последнее очевидно, если сравнить покрытия 3 и 4 в исходном состоянии (см. рис. 3, в, з) и после испытаний (см. рис. 6, в и з), т. е. верхние слои покрытий, наиболее насыщенные трещинами, удаляются в виде частиц износа. После испытаний покрытий образцов 3 и 4 в них не обнаружено участков полного отделения покрытий от чугунной подложки.

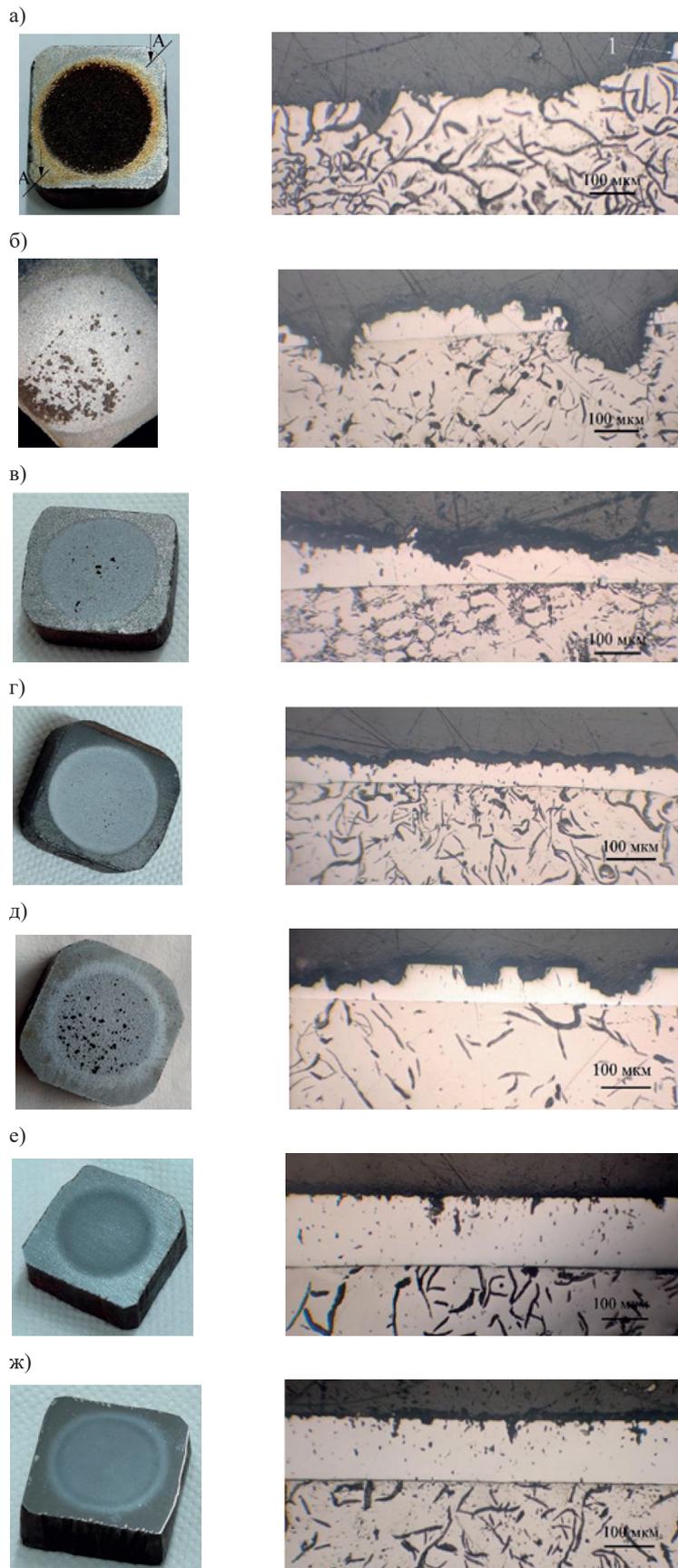


Рис. 6. Внешний вид испытанных образцов и их поперечного сечения в очаге кавитационного износа:  
*a* — образец 1 после 7 ч испытаний (*1* — остаток хромового покрытия); *б* — образец 2 после 10 ч испытаний;  
*в* — образец 3 после 18 ч испытаний; *г* — образец 4 после 18 ч испытаний; *д* — образец 5 после 12 ч испытаний;  
*е* — образец 6<sub>ш</sub> после 32 ч испытаний; *ж* — образец 6<sub>п</sub> после 32 ч испытаний

Для покрытий образцов 1 и 2 после прохождения максимума значение параметра  $R_a$  проходит минимум и начинает возрастать (начало увеличения параметра  $R_a$  соответствует началу разрушения серого чугуна). Для покрытия образца 1 (см. рис. 4, *а*) участки полностью удаленного покрытия появляются уже через 1 ч, что соответствует минимуму зависимости  $R_a(t)$  кавитационного воздействия, и после 4 ч изнашивания хромовое покрытие оказывается полностью удаленным, в этот момент также происходит изменение характера зависимости  $R_a$  (см. рис. 4, *а*). На рис. 6, *а* показано, что хромовое покрытие полностью удалено в очаге кавитационного износа, видны остатки (обозначены цифрой 1) хромового покрытия на периферии очага износа, из уровня расположения которых следует, что разрушение чугунной подложки произошло на заметную глубину. Для покрытия образца 2 минимум на графике  $R_a(t)$  наступает лишь после 6 ч испытаний (см. рис. 4, *б*), и, кроме того, полное отделение хромового покрытия от чугунной подложки произошло лишь на некоторых участках (рис. 6, *б*). Таким образом, покрытие образца 2 оказалось более износостойким, чем покрытие образца 1, что объясняется тем, что в отличие от покрытия образца 1 в покрытии образца 2 отсутствуют широкие длинные сквозные трещины. Тем не менее толщина покрытия образца 2 является недостаточной для того, чтобы обеспечить продолжительную долговечность в условиях кавитационного воздействия.

Так же, как и в случае кавитационного изнашивания покрытий образцов 3 и 4, при испытании покрытия образца 5 (рис. 6, *д*) и покрытий образцов  $6_{\text{ш}}$  и  $6_{\text{п}}$  (рис. 6, *е, ж*) кавитационное повреждение не достигает чугунной подложки. Изнашивание покрытия образца 5 (см. рис. 6, *д*) определяется исходной структурой покрытия (см. рис. 3, *д*), отличающейся чередованием участков плотного (с отсутствием трещин) покрытия и участков скопления трещин, в которых имеются трещины с большим раскрытием. Поэтому кавитационное разрушение покрытия образца 5 (см. рис. 6, *д*) происходит путем отделения сравнительно больших частиц износа в результате выламывания покрытия на участках скопления трещин, при этом участки с исходной плотной структурой остались практически неповрежденными.

Износостойкость покрытий образцов  $6_{\text{ш}}$  и  $6_{\text{п}}$ , в которых отсутствуют протяженные широкие трещины, оказалось наиболее высокой. Как видно из рис. 6, *е, ж*, кавитационные разрушения этих покрытий представляют собой язвы глубиной 10–45 мкм и диаметром 10–30 мкм, что соизмеримо с диаметром ударных микроструй, генерируемых при испытании на МСВ, т. е. характер кавитационного разрушения покрытий образцов  $6_{\text{ш}}$  и  $6_{\text{п}}$  отличается от характера кавитационного разрушения покрытия образцов 1–5 (см. рис. 6, *а–д*) — в последних размер повреждений определяется длиной и раскрытием трещин в исходном состоянии.

Таким образом, износостойкость хромовых электролитических покрытий при кавитации определяется двумя факторами: характером трещин в покрытии и толщиной покрытия. Толщина покрытия влияет на его долговечность, а характер трещин — как на долговечность, так и на скорость изнашивания хромового покрытия. Очевидно, густота сетки трещин, выходящих на поверхность, и их ширина определяют шероховатость поверхности, а так как кавитационный износ начинается с районов покрытия, примыкающих к берегам трещины, должна проследиваться зависимость между скоростью изнашивания и высотным параметром шероховатости  $R_a$ . Действительно, согласно рис. 7, большинство точек формируют единую зависимость скорости изнашивания от значения параметра  $R_a$ , обозначенную линией. Скорость изнашивания  $I_t$  находили как отношение средневзвешенного износа и продолжительности испытаний:

$$I_t = \frac{I_{\text{ср.взв}}}{t} = \frac{1}{t^2} \int_0^t \Delta M(t) dt,$$

где  $t$  — продолжительность испытаний;

$I_{\text{ср.взв}}$  — средневзвешенный износ, определяемый как отношение площади под зависимостью  $\Delta M(t)$  к продолжительности кавитационного воздействия  $t$ .

На рис. 7 видно, что точка, соответствующая покрытию образца 1, не подчиняется общей зависимости  $I_t(R_a)$ . Тот факт, что точка, соответствующая покрытию образца 1, выпадает из общей

группы точек, объясняется тем, что скорость изнашивания покрытия образца 1 определяется главным образом скоростью изнашивания чугунной подложки, так как большая часть хромового покрытия была удалена уже через 1 ч кавитационного воздействия. В то же время положение точки, соответствующей образцу покрытия 2, подчиняется общей зависимости, несмотря на то, что образец покрытия 2 местами тоже был удален с чугунной подложки и в этих местах начался износ чугуна (см. рис. 6, б), тем не менее незначительный вклад потерь массы чугуна в общий износ образца не мог повлиять на положение точки, соответствующей покрытию образца 2.

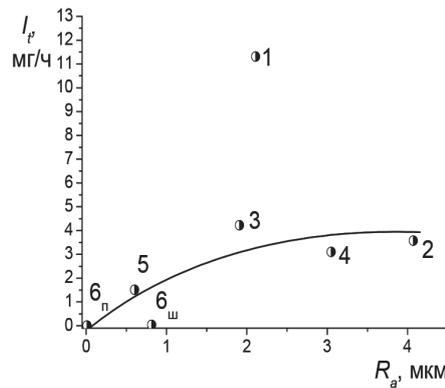


Рис. 7. Зависимость средней скорости изнашивания хромовых электролитических покрытий от высотного параметра шероховатости  $R_a$  покрытий в исходном (до испытания) состоянии (номер точки соответствует номеру образца покрытия в таблице)

О влиянии шероховатости поверхности металлов и сплавов на их кавитационную износостойкость известно давно: установлено, что чем лучше обработана поверхность, тем меньше интенсивность кавитационных разрушений в начальный период изнашивания<sup>4</sup>. Однако применительно к хромовым электролитическим покрытиям подробные исследования о влиянии шероховатости их поверхности на кавитационную износостойкость не проводились. Существование зависимости  $I_p(R_a)$  позволяет сделать вывод о том, что поверхность втулок цилиндров после хромирования необходимо подвергать шлифованию мелкозернистым инструментом и по возможности полированию. При этом покрытие должно быть плотным и не содержать широких протяженных трещин.

### Заключение (Conclusion)

Износостойкость хромовых электролитических покрытий при кавитации определяется двумя факторами: характером трещин в покрытии и толщиной покрытия. Толщина покрытия влияет на его долговечность, а характер трещин — как на долговечность, так и на скорость изнашивания хромового покрытия.

Кавитационный износ начинается с районов покрытия, примыкающих к берегам трещины — в начальный период кавитационного воздействия происходит хрупкий откол частиц от покрытия путем его разрушения по уже имеющимся трещинам в исходном покрытии. Густота сетки трещин, выходящих на поверхность, и их ширина определяют шероховатость поверхности.

Между скоростью кавитационного изнашивания хромовых электролитических покрытий и высотным параметром шероховатости  $R_a$  исходной поверхности покрытий существует зависимость, которая позволяет сделать вывод о необходимости после хромирования поверхности втулок цилиндров производить шлифование покрытия мелкозернистым инструментом и по возможности полирование. При этом для обеспечения высокой кавитационной износостойкости хромовое покрытие должно быть плотным, а именно не содержать широких протяженных трещин.

<sup>4</sup> Иванченко, Н. Н. Кавитационные разрушения в дизелях: монография / Н. Н. Иванченко, А. А. Скуридин, М. Д. Никитин. Л.: Машиностроение, 1970. 152 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liu D.* Modelling and evaluating piston slap-induced cavitation of cylinder liners in heavy-duty diesel engines. / D. Liu, N. Sun, G. Zhu, H. Cao, T. Wang, G. Li, F. Gu // *Eksploracja i Niezawodność — Maintenance and Reliability.* — 2023. — Vol. 25. — Is. 3. DOI: 10.17531/ein/169644.
2. *Tong D.* An Analysis of the Factors Influencing Cavitation in the Cylinder Liner of a Diesel Engine / D. Tong, S. Qin, Q. Liu, Y. Li, J. Lin // *Fluid Dynamics & Materials Processing.* — 2022. — Vol. 18. — Is. 6. — Pp. 1667–1682. DOI: 10.32604/fdmp.2022.019768.
3. *Bako S.* Cavitation deterioration of diesel power plant cylinder liner / S. Bako, A. Nasir, B. Ige, N. Musa // *Journal of Mechanical and Energy Engineering.* — 2020. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 239–246. DOI: 10.30464/jmee.2020.4.3.239.
4. *Park I–C.* Cavitation erosion characteristics of hard chromium plated diesel engine cylinder liner / I–C. Park, S–J. K. and // *Transactions of the IMF.* — 2022. — Vol. 100. — Is. 4. — Pp. 189–192. DOI: 10.1080/00202967.2022.2063588.
5. *Mekicha M. A.* The effect of hard chrome plating on iron fines formation / M. A. Mekicha, M. B. Rooij, D. T. A. Matthews, C. Pelletier, L. Jacobs, D. J. Schipper // *Tribology International.* — 2020. — Vol. 142. — Pp. 106003. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
6. *Astanin V. K.* Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair / V. K. Astanin, E. V. Pukhov, Y. A. Stekolnikov, V. V. Emtsev, O. A. Golikova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* — 2018. — Vol. 327. — Is. 3. — Pp. 032008. DOI: 10.1088/1757–899X/327/3/032008.
7. *Zhang W.* Strengthening the Cavitation Resistance of Cylinder Liners Using Surface Treatment with Electroless Ni–P (ENP) Plating and High-Temperature Heat Treatment / W. Zhang, H. Gao, Q. Wang, D. Liu, E. Zhang // *Materials.* — 2025. — Vol. 18. — Is. 5. DOI: 10.3390/ma18051087.
8. *Вихров Н. М.* Гидродинамика процесса анодно-струйного хромирования / Н. М. Вихров, В. А. Голицын // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова.* — 2013. — № 2(21). — С. 77–86. — EDN RUOIBJ.
9. *Вихров Н. М.* Влияние проточного электролитического хромирования на предел выносливости стали / Н. М. Вихров, В. А. Голицын // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова.* — 2014. — № 4(26). — С. 59–67. — EDN SKOIBD.
10. *Ngon D. T.* Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts / D. T. Ngon, L. C. Cuong, N. V. Phoi // *2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD) 2016.* — С. 135–140. DOI: 10.1109/GTSD.2016.40.
11. *Podgornik B.* Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings / B. Podgornik, O. Massler, F. Kafexhiu, M. Sedlacek // *Tribology International.* — 2018. — Vol. 121. — Pp. 333–340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.
12. *Sohi M. H.* Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings / M. H. Sohi, A. A. Kashi, S. M. M. Nadavi // *Journal of Materials Processing Technology.* — 2003. — Vol. 138. — Is. 1. — Pp. 219–222. DOI: 10.1016/S0924–0136(03)00075–X.
13. *Цветков Ю. Н.* Особенности изнашивания хромовых электролитических покрытий при кавитационном воздействии / Ю. Н. Цветков, Б. О. Горбаченко, В. А. Голицын, А. Д. Чеблоков // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2024. — Т. 90. — № 9. — С. 75–84. DOI: 10.26896/1028–6861–2024–90–9–75–84. — EDN KRPTDX.
14. *Цветков Ю. Н.* Особенности технологии подготовки микрошлифов хромового гальванического покрытия / Ю. Н. Цветков, А. Д. Баранов, А. Д. Чеблоков // *Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 25 сентября — 2023 года.* — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 387–392. — EDN EOCTHX.
15. *Цветков Ю. Н.* Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2015. — Т. 81. — № 11. — С. 62–65. — EDN UXWBMB.
16. *Цветков, Ю. Н.* Прогнозирование кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий по профилю изношенной поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко, В. А. Голицын // *Вестник машиностроения.* — 2019. — № 4. — С. 79–86. DOI 10.3103/S1068798X19070232. — EDN ACMQXZ.
17. ASTM G32–16 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. ASTM International, 2016. — 20 p.

## REFERENCES

1. Liu, D., et al. “Modelling and evaluating piston slap-induced cavitation of cylinder liners in heavy-duty diesel engines.” *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability* 25.3 (2023). DOI: 10.17531/ein/169644.
2. Tong D. An Analysis of the Factors Influencing Cavitation in the Cylinder Liner of a Diesel Engine / D. Tong, S. Qin, Q. Liu, Y. Li, J. Lin // *Fluid Dynamics & Materials Processing*. — 2022. — Vol. 18. — Is. 6. — Pp. 1667–1682. DOI: 10.32604/fdmp.2022.019768.
3. Bako, S., A. Nasir, B. Ige and N. Musa. “Cavitational deterioration of diesel power plant cylinder liner.” *Journal of Mechanical and Energy Engineering* 4.3 (2020): 239–246. DOI: 10.30464/jmee.2020.4.3.239.
4. Park, I–C. and S–J. K. and. “Cavitation erosion characteristics of hard chromium plated diesel engine cylinder liner.” *Transactions of the IMF* 100.4 (2022): 189–192. DOI: 10.1080/00202967.2022.2063588.
5. Mekicha, M. A., et al. “The effect of hard chrome plating on iron fines formation.” *Tribology International* 142 (2020): 106003. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
6. Astanin, V. K., O. A. Golikova, et al. “Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 327.3 (2018): 032008. DOI: 10.1088/1757–899X/327/3/032008.
7. Zhang, W., E. Zhang, et al. “Strengthening the Cavitation Resistance of Cylinder Liners Using Surface Treatment with Electroless Ni–P (ENP) Plating and High-Temperature Heat Treatment.” *Materials* 18.5 (2025). DOI: 10.3390/ma18051087.
8. Vikhrov, N. M. and V. A. Golitsyn. “Gidrodinamika protsessa anodno-struynogo khromirovaniya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 77–86.
9. Vikhrov, N. M. and V. A. Golitsyn. “Vliyanie protochnogo elektroliticheskogo khromirovaniya na predel vynoslivosti stali.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 59–67.
10. Ngon, D. T., L. C. Cuong and N. V. Phoi. “Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts.” *2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)2016*: 135–140. DOI: 10.1109/GTSD.2016.40.
11. Podgornik, B., O. Massler, F. Kafexhiu and M. Sedlacek. “Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings.” *Tribology International* 121 (2018): 333–340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.
12. Sohia, M. H., A. A. Kashia and S. M. M. Hadavi. “Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings”. *Journal of Materials Processing Technology* 138.1 (2003): 219–222. DOI: 10.1016/S0924–0136(03)00075–X.
13. Tsvetkov, Yu. N., B. O. Gorbachenko, V. A. Golitsyn and A. D. Cheblokov. “Features of cavitation wear of chrome electrolytic coatings.” *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics* 90.9 (2024): 75–84. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-9-75-84.
14. Tsvetkov, Yu. N., A. D. Baranov and A. D. Cheblokov. “Peculiarities of technology of preparing the microsections of chrome electrolyte deposit.” *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO “GUMRF imeni admirala S. O. Makarova”, Sankt-Peterburg, 25 sentyabrya — 202023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023: 387–392.
15. Tsvetkov, Yu. N. and E. O. Gorbachenko. “Estimation of incubation period at cavitation wear of steel through measuring roughness.” *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics* 81.11 (2015): 62–65.
16. Tsvetkov, Yu. N., E. O. Gorbachenko and V. A. Golitsyn. “Predicting the Cavitation Wear Resistance of Electrolytic Chromium Coatings”. *Russian Engineering Research* 39.7 (2019): 580–586. DOI: 10.3103/S1068798X19070232.
17. *ASTM G32–16 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device*. ASTM International, 2016.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Цветков Юрий Николаевич** —  
 доктор технических наук, профессор,  
 Государственный университет морского  
 и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,  
 198035 Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, д. 5/7,  
 e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tsvetkov Yuriy Nikolayevich** —  
 doctor of science, professor,  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping,  
 d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035,  
 Russian Federation.  
 e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru)

**Горбаченко Евгений Олегович** —  
кандидат технических наук  
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»,  
198184, г. Санкт-Петербург, Канонерский остров, 41  
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

**Чеблоков Андрей Дмитриевич** —  
инженер-технолог,  
АО «Концерн «Морское подводное вооружение –  
Гидроприбор»»,  
194044, г. Санкт-Петербург, пр. Большой  
Сампсониевский, дом 24А, литер 3  
e-mail: cheblokovandrey@gmail.com

**Gorbachenko Evgeniy Olegovich** — PhD,  
JSC “KSZ”,  
41, Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184,  
Russian Federation  
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

**Cheblokov Andrey Dmitrievich** —  
manufacturing engineer,  
JSC “Concern “Sea underwater weapon –  
Gidropribor”,  
24, lit. 3, B. Sampsonievskii prospect, Saint-Petersburg  
Petersburg, 198035, Russian Federation.  
e-mail: cheblokovandrey@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 13 марта 2025 г.  
Received: Mar. 13, 2025.*

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458

EDN WVZEVZ

## METHODOLOGY FOR FORMING AN INTEGRAL ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE AT THE DESIGN STAGE

**V. V. Korotkov**

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

*Transport systems, as objects of automated control, impose a number of specific requirements on the reliability of such control. Firstly, in addition to ensuring the reliability of individual technical components and subsystems, it is necessary to guarantee the security of information flows circulating within the human-machine control loop under conditions of increasing digitalization. Secondly, the same requirements apply to the software being developed. Thirdly, the use of cloud technologies for big data storage necessitates the consideration of protective measures of both technical and algorithmic nature at the design stage. Finally, the functional heterogeneity of a wide range of technical devices included in both the controller and the controlled object requires, at the design stage, the development of a methodology for a generalized, integrated, and predictive assessment of the reliability of the automated control system as a basis for evaluating alternative options for its structure and composition. In this context, the high vulnerability of water transport system facilities to various risks and vulnerabilities, both seasonal and permanent, must be considered. This underscores the relevance of developing a method for constructing an integrated assessment of the reliability of automated control systems for water transport facilities, which is the aim of this study. Within this general task, the following issues are addressed: determining the dimension and structure of the integral indicator; including qualitatively described vulnerabilities inherent in the control object and control loop; constructing a mathematical model of the functioning of the designed automated control system; building, on this basis, a management simulation model to analyze the “bottlenecks” that most significantly impact the assessment; and using probabilistic and theoretical methods of active risk management at the stage of considering alternative options for individual parts of the project. The methodological basis of the study includes the general provisions of applied probability theory, the theory of experimental design on simulation models, and the optimization of the design reliability indicator using mathematical programming tools. The result is a method for constructing an integral indicator of the design reliability of an automated control circuit for large water transport systems, aggregating the probabilities of heterogeneous technical vulnerabilities, information vulnerabilities at cloud interface points, and potential software errors.*

*Keywords: water transport systems, mathematical modeling, methodology, automated control systems, technical system reliability, random variable distribution, optimization.*

### For citation:

Korotkov, Vitaliy V. “Methodology for forming an integral assessment of the reliability of automated control systems of transport infrastructure at the design stage”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 449–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458.

УДК 004.6:656.6

## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**В. В. Коротков**

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

Темой исследования являются большие системы водного транспорта, в частности порты, судоходные компании, судостроительные и судоремонтные предприятия, логистические центры, шлюзованные судоходные каналы, регулируемые внутренние водные пути, которые как объекты автоматизированного управления предъявляют следующие требования к его надежности: обеспечение на необходимом уровне безопасности и надежности отдельных технических узлов и подсистем и информационных потоков, циркулирующих в человеко-машинном контуре управления в условиях нарастающей цифровизации транспорта (аналогичное требование должно быть установлено для разрабатываемого программного обеспечения); использование облачных технологий хранения больших данных, что требует учета на стадии проектирования защитных мероприятий как технического, так и алгоритмического характера; разработка на стадии проектирования методики обобщенной интегрированной прогнозной оценки надежности АСУ как основы рассмотрения альтернативных вариантов ее структуры и состава ввиду функциональной разнородности широкого спектра технических устройств, входящих как в субъект, так и в объект управления. Отмечается, что при этом должна быть учтена высокая подверженность объектов воднотранспортной системы многообразным рискам и уязвимостям, как сезонным, так и постоянно действующим (тем самым определяется актуальность разработки метода построения интегральной оценки надежности АСУ для объектов водного транспорта как цели исследования). В рамках общей задачи предлагается решение следующих вопросов: определение размерности и структуры интегрального показателя; включение качественно описываемых уязвимостей, имманентно присущих объекту управления и контуру управления; построение математической модели функционирования проектируемой АСУ; построение на этой основе имитационной модели управления с целью анализа «узких мест», в наибольшей степени влияющих на ухудшение оценки; использование теоретико-вероятностной методики активного управления рисками на стадии рассмотрения альтернативных вариантов отдельных частей проекта. Методологическую основу исследования составляют общие положения прикладной теории вероятностей, теория планирования эксперимента на имитационной модели, оптимизация проектного показателя надежности средствами математического программирования. Результатом работы является метод построения интегрального показателя проектной надежности контура автоматизированного управления для больших систем водного транспорта, агрегирующего вероятности проявления разнородных уязвимостей технических узлов, информационных уязвимостей в точках выхода в облачную среду и потенциальных ошибок в программном обеспечении.

*Ключевые слова:* системы водного транспорта, математическое моделирование, методика, автоматизированные системы управления, надежность технической системы, распределение случайных величин, оптимизация.

**Для цитирования:**

Коротков В. В. Математическая модель формирования интегральной оценки надежности автоматизированной системы управления на стадии проектирования / В. В. Коротков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 449–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458. — EDN WVZEVZ.

## Введение (Introduction)

Оценка надежности автоматизированной системы управления объектом водного транспорта, будучи одним из необходимых начальных этапов проектирования, имеет своей методологической основой соответствующий государственный стандарт, в соответствии с которым системными показателями надежности АСУ должны служить неформализованные детально в указанном ГОСТе возможность надлежащей реализации функций управления и количественная оценка прогнозной частоты рискованных происшествий. Особенно важное значение имеет обеспечение надежности информационной управляющей инфраструктуры в ситуациях, когда объекты управления являются критически важными, в перечень которых, в соответствии с решением СБ РФ от 08.11.2005 г., входит водный транспорт. Тем самым определяется актуальность проблемы разработки методики построения обобщающего интегрального показателя проектной надежности, который при его наличии допускает следующие виды использования: *пассивное* — информирование заказчика, *оптимизирующее* — представленное в качестве целевой функции при наличии вариантов аппаратного исполнения, технологий хранения и защиты данных. Во втором случае существенный интерес представляет возможность соотнесения показателя надежности и обеспечивающего его уровня затрат, которая может быть реализована с помощью использования расчетной модели в диалоговом режиме. Разнородность составляющих функциональных подсистем, неполнота, а подчас и отсутствие статистических данных о возможных отказах и других рискованных происшествиях,

в том числе на уровне данных, приводят к совместному использованию теоретико-вероятностных процедур, метода экспертных оценок, математического и на этой основе имитационного моделирования.

Автоматизированное управление объектами транспортной инфраструктуры реализуется при помощи сложных технических систем, надежность функционирования которых предполагает, во-первых, надежность (безотказность) аппаратных средств, предусматриваемых проектом, во-вторых, надежность (безопасность) хранения данных, и, в-третьих, надежность (отсутствие ошибок) программного обеспечения. Интегральный показатель надежности проектного решения АСУ должен в формализованном виде учитывать все три указанных аспекта.

В рыночных условиях проектировщик и будущий пользователь АСУ (заказчик) осуществляют свою деятельность в рамках ограниченного бюджета. Отсюда следуют две возможные постановки задачи обеспечения надежности системы управления. В первом случае при заданной верхней границе стоимости всей совокупности аппаратных и программных средств проектируемой АСУ обеспечивается максимум предварительно сформулированного обобщенного (интегрального) показателя надежности, выражаемого фиксированной единицей измерения, в том числе априори возможен безразмерный показатель. Во втором случае задается необходимое значение показателя надежности и выбирается аппаратно-информационная структура АСУ, обеспечивающая минимум стоимости. В обоих случаях отправной точкой проектного обеспечения надежности является формирование соответствующего показателя. Существенный интерес представляет агрегирование показателя, дающего возможность соотнесения показателя надежности и обеспечивающего его уровня затрат (такое соотнесение может быть реализовано расчетной моделью в диалоговом режиме).

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим априорные предпосылки для формального определения интегрального показателя надежности  $H$ . Представляется, что он должен иметь мультипликативную структуру, при которой низкая надежность одной из составляющих (аппаратной, программной) либо сохранности данных не будет нивелироваться высокими значениями других составляющих. Кроме того, мультипликативная структура исключает проблему разной размерности отдельных составляющих, которая имеет место при аддитивном построении  $H$ . В соответствии с этим определим показатель  $H$  в виде

$$H = H_{\text{ап}} H_{\text{пр}} H_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $H_{\text{ап}}$  — надежность аппаратного контура;

$H_{\text{пр}}$  — надежность программного обеспечения;

$H_{\text{д}}$  — надежность хранения данных.

Проектные решения должны учитывать два аспекта общей надежности: аппаратный и стоимостной, расширяя тем самым информированность заказчика и позволяя при необходимости закладывать ограничения по стоимости в математическую оптимизационную модель.

*Показатель аппаратной надежности АСУ.* Структурно-функциональная схема АСУ позволяет разбить аппаратный контур на подсистемы  $S_1, \dots, S_k$ , работоспособность каждой из которых слабо влияет либо совсем не влияет на работоспособность других систем. Так, например, в первом приближении можно рассматривать как изолированные терминалы распределенной сети удаленных пользователей, системы хранения данных и т. п.

При формировании показателя  $H_{\text{апп}}$ , так как именно он, как правило, рассматривается в качестве общего показателя надежности АСУ, т. е. в качестве системного показателя, что снижает объективность целостной оценки, будем исходить из перечня  $Y_1^{(i)}, \dots, Y_n^i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) устройств для каждой из выделенных подсистем. АСУ относятся к классу *восстанавливаемых систем*, поэтому для каждого устройства  $Y_j^{(i)}$  предполагаем известными функцию распределения  $f_j^{(i)}(t)$  случайной величины  $\eta_j^{(i)}$ , представляющей показатель длительности наработки на отказ,

и функцию распределения  $g_j^{(i)}(t)$  случайной величины  $\theta_j^{(i)}$ , представляющей показатель длительность восстановления. Таким образом, для оценки надежности отдельного устройства рассматривают обе ее составляющие: *безотказность* и *ремонтпригодность*. В формируемом частном показателе  $H_{\text{ап}}^{(i)}$  естественно использовать математические ожидания  $\bar{\eta}_j^{(i)}$  и  $\bar{\theta}_j^{(i)}$ . Для выбора распределений и определения их параметров для имеющихся статистических данных об отказах и восстановлениях рабочего состояния проверяются гипотезы о показательном, нормальном и Вейбулл – Гнеденко распределениях (гипотеза об одном из них принимается в качестве *нулевой*, а о другом — в качестве *конкурирующей*).

Изолированное рассмотрение случайных величин  $\eta_j^{(i)}$  и  $\theta_j^{(i)}$  в недостаточной мере раскрывает аппаратную надежность, поскольку большое значение длительности безаварийной работы устройства теоретически может быть сопряжено с большой длительностью восстановления. Агрегирование показателя  $H_{\text{ап}}^{(i)}$ , связывающего обе указанные характеристики, должно удовлетворять априорному требованию: возрастанию надежности по аргументу  $\eta_j^{(i)}$  и убыванию по аргументу  $\theta_j^{(i)}$  для каждого  $j$ . Представляется целесообразным выполнить это следующим образом. Пусть  $\eta_{\text{max}}^{(i)} = \max(\eta_1^{(i)}, \dots, \eta_{n_j}^{(i)})$ ,  $d_j^{(i)} = \eta_{\text{max}}^{(i)} / \eta_j^{(i)}$  — временной вес отказной характеристики устройства  $Y_j^{(i)}$  на длительности  $\eta_{\text{max}}^{(i)}$ . Тогда, согласно принципу мультипликативности, в качестве интегрального показателя подсистемы принимаем характеристику

$$H_{\text{ап}}^{(i)} = \prod_{j=1}^{n_j} d_j^{(i)} / \theta_j^{(i)}, \quad (1)$$

откуда

$$H_{\text{ап}} = \prod_{i=1}^k H_{\text{ап}}^{(i)}. \quad (2)$$

Построенный показатель является безразмерным. Если исходить из заданного горизонта оценивания  $[0, T]$ , привязанного, например, к циклу технико-экономического планирования транспортной системы), то можно перейти к показателю с размерностью времени

$$h_{\text{ап}} = H_{\text{ап}} T, \quad (3)$$

который назовем *системным временем безотказной работы*. Следует отметить, что данный подход является альтернативным в методологии нечетких множеств, реализованной в отраслевых публикациях [1] и [2].

*Стоимостной показатель надежности аппаратного контура АСУ.* Показатель надежности автоматизированной системы управления в стоимостном выражении должен служить наряду с другими показателями основанием для обоснованного выбора из проектных альтернатив формирования аппаратного контура, когда его функционал может быть обеспечен разными наборами устройств. Рассмотрим вначале случай отдельной функциональной подсистемы. Для устройства  $Y_j^{(i)}$  введем в рассмотрение длительность амортизационного периода  $a_j^{(i)}$ . Тогда ожидаемое число отказов составляет  $r_j^{(i)} = [a_j^{(i)} / \bar{\eta}_j^{(i)}]$ . Если пренебречь ошибкой округления до целого, то для горизонта  $[0, T]$  получим коэффициент  $q_j^{(i)} = r_j^{(i)} T / a_j^{(i)} = T / \bar{\eta}_j^{(i)}$ . Пусть  $s_j$  — средняя стоимость одного восстановления (стоимостное выражение ремонтпригодности). Тогда для всей подсистемы получим затраты  $S^{(i)} = \sum_j q_j^{(i)} s_j^{(i)}$ . При стоимости  $C$  аппаратного контура подсистемы приходим к безразмерному стоимостному показателю надежности, для которого естественно предполагать, что  $S^{(i)} < S_0^{(i)}$ :

$$H_{\text{ап}}^{\text{ст}}(i) = 1 - S^{(i)} / C. \quad (4)$$

После этого для совокупности  $k$  подсистем  $H_{\text{ап}}^{\text{ст}} = \prod_{i=1}^k H(i)$ .

Для сравнения проектных альтернатив возможен переход к показателю с размерностью стоимости. Если  $S = \sum_i S^{(i)}$  — проектная стоимость аппаратной части проекта, то полагаем

$$S_{\text{ап}}^{\text{ст}} = H_{\text{ап}}^{\text{ст}} S. \quad (5)$$

Методы математического моделирования позволяют дополнить изложенную методику проектного обеспечения и проектной оценки надежности оптимизационной моделью.

**Оптимизационная модель формирования аппаратного контура АСУ.** Помимо сравнения нескольких априорных вариантов технического оснащения возможна постановка задачи его оптимизации на основе показателей (1)–(5). Следуя общей логике теории математического программирования, а именно двойственности экстремальных задач, рассмотрим два подхода, в которых целевая функция и ограничения меняются местами.

**Первый подход.** Пусть функциональная подсистема должна включать (в соответствии с ее распределенной структурой) априорно заданное количество  $k_j$  однородных устройств с  $j$ -м выходным функционалом  $j = 1, \dots, n$ ;  $c_j$  — стоимость одного устройства. Тогда стоимость подсистемы

$$C = \sum_{j=1}^n k_j c_j. \quad (6)$$

Остальные обозначения для устройств сохраним в прежнем виде (без верхних индексов). Тогда

$$C = \sum_{j=1}^n C^{(j)},$$

где все слагаемые  $C^{(j)}$  вычисляются согласно выражению (6).

Если исходить из цели минимизации стоимости  $F$  контура, дополненной затратами на восстановление при отказах, то при заданном значении стоимостной надежности  $H$  приходим к невыпуклой задаче математического программирования с управляемыми переменными  $c_j, r_j, a_j, \eta_j$ :

$$F(c_j, r_j, a_j, \eta_j) \in LC + S \rightarrow \min,$$

при ограничениях на предельные нижние и верхние значения управляемых переменных:

$$X = (c_j, r_j, a_j, \eta_j) \in L;$$

$$H_{\text{ап}}^{\text{ст}} \geq H,$$

где  $L$  — параллелепипед в фазовом пространстве этих переменных.

Поскольку отсутствие выпуклости у целевой влечет возможное наличие более чем одного минимума, возможен также второй подход к поиску условного минимума [1]: в  $L$  выбирается регулярная либо случайная (методом Монте-Карло) совокупность стартовых точек, для которых осуществляется градиентный поиск минимума [2], совокупность которых признается достаточной, если ее количественное удвоение не дает новых минимумов. Теперь, если  $X_0$  — найденная точка минимума, то в качестве оптимального варианта формирования аппаратного контура выбирается из имеющихся альтернатив тот вариант, для которого декартово расстояние оказывается минимальным.

**Показатель прогнозной надежности программного обеспечения АСУ.** Анализ источников, в том числе электронных (например, [7]–[13]), свидетельствует о том, что большинство предлагаемых методик оценки надежности программного обеспечения (ПО), не отличаясь, по сути, от методик оценки надежности аппаратных средств системы управления, имеют апостериорный характер и относятся к эксплуатационным характеристикам, базирующимся на анализе динамики отказов, что в данном случае означает проявление ошибок программирования. В связи с этим поскольку принципиальное отличие задачи оценки проектной надежности от эксплуатационной заключается в отсутствии имеющейся статистики, необходим альтернативный подход, связанный с модельной имитацией процесса эксплуатации АСУ.

С точки зрения технологии программирования показатель надежности ПО тесно взаимосвязан с рисками, возникающими при его разработке. Анализ последних (с привлечением оптимизирующих моделей) содержится в публикации [3], выводы которой можно принять в качестве методологической основы для дальнейшего развития, с тем уточнением, что в указанной работе предметом моделирова-

ния является предпроектное активное управление рисками (дополнительные затраты на снижение вероятностей последних), в то время как целью данного исследования служит формирование агрегированного показателя надежности  $H_{пр}$  уже разработанного, но еще не введенного в эксплуатацию ПО.

ГОСТ<sup>1</sup> качества ПО содержит общие неформализованные определения, из которых в рассматриваемом контексте важна «защищенность программного средства: «...совокупность свойств программного средства предотвращать несанкционированный доступ к программам и данным». Здесь мы будем трактовать это как обеспечение сохранности данных, циркулирующих в контуре управления. Другим аспектом надежности ПО, в данном случае следует считать вероятное отсутствие ошибок в коде. Здесь речь должна идти о семантических ошибках, которые, в отличие от синтаксических, не выявляются на этапе трансляции при проверке формальной корректности кода.

Наличие / отсутствие семантической ошибки не является характеристикой, имманентно присущей программе. Поэтому несмотря на известный тезис Э. Дейкстры [4] о невозможности доказательства полного отсутствия семантических программных ошибок, постпроектное тестирование является единственным способом оценки  $H_{пр}$ . Так же, как и в случае показателя аппаратной надежности, рассмотрим два варианта: *вероятностный* (безразмерный) и *стоимостной*. В отличие от концепции [3] во втором случае при агрегировании оценки будем использовать вероятные рисковые потери не разработчика, а пользователя.

Размер кода является наряду со сложностью наиболее существенным фактором возникновения ошибок [5]. Поэтому, как и ранее, будем формировать показатель  $H_{пр}$  мультипликативным образом в виде произведения надежности по ошибкам и надежности по сложности:  $H_{пр} = \lambda_{ош} \lambda_{слож}$ . Для первого множителя  $\lambda_{ош}$  определим финальное значение коэффициента надежности  $\lambda_{ош}$  в отношении ошибок программирования как прогноз на индекс  $2n$  по характеру значений показателя  $\lambda_i = t_i / L_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) — модельного времени наработки на отказ  $t_i$ , отнесенного к длине программы  $L_i$  (в ходе тестирования плановое значение  $L_i$ , как правило, монотонно возрастает). Укажем в этой связи на известный (тривиальный) тезис: тестирование показывает выявленные ошибки, не гарантируя при этом отсутствие не выявленных. Таким образом,

$$\lambda_{ош} = tr(2n),$$

где  $tr$  — сглаженная функция тренда.

Показатель  $\lambda_{ош}$  имеет размерность времени. Он может быть нормирован на безразмерную единицу: если  $\lambda = \max(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \lambda_{ош})$ , то

$$\lambda_{ош}^{норм} = \lambda_{ош} / \lambda,$$

что расширяет возможности сравнения альтернативных проектных вариантов ПО.

Что касается второго множителя  $\lambda_{слож}$ , то прежде всего следует отметить, что, по крайней мере, с 1960-х гг. существует тенденция включать в число факторов, влияющих на пока не формализованную сложность программы — *размер финального кода* (например, в строках), который обозначим через  $R$ .

Представляется, что в качестве следующего фактора целесообразно включить в модель для  $\lambda_{слож}$  — *показатель функциональной неоднородности ПО*, который может быть определен как количество  $K$  разных по реализуемому функционалу больших модулей на укрупненной блок-схеме трафика информационных потоков (например, обслуживание баз данных, защита баз данных, планирование разного уровня для отдельных подразделений транспортной системы, сопровождение движения финансов и др.). Заметим, что показатель  $K$  логически соотносится с используемым в оценке рисков разработки ПО количеством: «...функционально-тематически ориентированных групп разработчиков подмодулей...» [3, с. 1106].

Кроме того, существенным для оценки сложности ПО (в той же логике соответствия риск – надежность) является количество  $F$  функциональных точек, связанных с отдельными функ-

<sup>1</sup> ГОСТ 28806–90. «Качество программных средств. Термины и определения». М., Госстандарт, 1990.

циями работы с данными и транзакций. Методика расчета  $F$  описана в регламенте ISO 20296: 2009 [7], а также в электронных изданиях (например, [9], [10]). Здесь будем исходить из уже сформированного значения  $F$ . Как и в предыдущих случаях, придадим агрегированному показателю мультипликативную структуру:

$$\lambda_{\text{слож}} = (KLF)^{-1}.$$

Частные производные по всем трем аргументам являются отрицательными, что согласуется с ожидаемым убыванием надежности ПО АСУ по мере увеличения частных показателей-аргументов  $K$ ,  $L$  и  $F$ .

**Показатель надежности хранения данных.** Стандартной современной аппаратно-технологической основой систем хранения данных (СХД), включенных в контур управления АСУ, являются дисковые системы с технологиями хранения / доступа (в порядке возрастания технических характеристик) RAID0: RAID7, SAS и SAT. Анализ публикаций последних лет (например, [9]) показывает, что во многих случаях авторы не проводят последовательного различия между надежностью хранения данных и отказоустойчивостью аппаратной части СХД (прежде всего (в основном) с временем наработки на отказ). В концепции данной публикации это должно быть отнесено к рассмотренным ранее показателям аппаратной надежности. Здесь рассмотрим только показатели, не связанные с отказами.

Наличие свободной памяти, не занятой актуальными данными, увеличивая себестоимость хранения (конкуренция стоимости и надежности неизбежна), уменьшает риски их потери (например, при переполнении), позволяя при необходимости использовать корректирующие и восстанавливающие коды, дублировать особо важную часть данных при возникновении внешних угроз. Поэтому представляется целесообразным включение в перечень агрегируемых в  $H_{\text{дан}}$  показателей безразмерного индикатора заполненности  $z$ , показывающего отношение усредненного по модельному времени суммарного объема свободной памяти всех хранилищ  $v_{\text{св}}$  к их номинальному объему  $v_{\Sigma}$  ( $0 < v_{\Sigma} < 1$ ):

$$z = v_{\text{св}} / v_{\Sigma}.$$

Информативным индикатором уровня надежности хранения данных является также отношение объема  $v_3 \neq 0$  данных, защищаемых корректирующими и исправляющими процедурами (типа кода Хэмминга) к общему объему данных:

$$k_{\text{в}} = v_3 / (v_{\Sigma} - v_{\text{св}}).$$

Наконец, при включенности в ПО защитных программных средств еще одним индикатором следует считать процент  $k_{\text{блок}} = v_3 / (v_{\Sigma} - v_{\text{св}})$  заблокированных модельных атак на данные (например, при подборе авторизованных ключей доступа).

В агрегировании, как и ранее, будем исходить из мультипликативного принципа:

$$H_{\text{д}} = zk_{\text{в}}k_{\text{блок}}.$$

Здесь любой из множителей может быть заменен на единицу при отсутствии данных без нарушения общего подхода к оценке надежности. Следует отметить, что информативными являются не только абсолютные значения показателей, но и их сопоставление для альтернативных вариантов проектов АСУ.

### Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussion)

Комплексная системная количественная оценка надежности разрабатываемой АСУ транспортно-системы может быть получена на стадии проектирования при совместном учете надежности аппаратного контура, надежности программного обеспечения и уровня сохранности данных на основе мультипликативного принципа:

$$H = H_{\text{ап}} H_{\text{пр}} H_{\text{д}}.$$

Это позволяет устранить проблему несовпадения размерностей при аддитивном агрегировании показателей отдельных сфер функционирования системы управления.

Для построения первого множителя  $H_{ан}$  привлекаются характеристики случайных величин наработки на отказ и длительности восстановления. Способ агрегации приводит к безразмерной величине. После привлечения множителя — горизонта времени анализа и планирования — ему можно придать размерность времени. Предложена оптимизационная по целевой функции затрат математическая модель формирования аппаратного контура в ходе разработки общего проекта аппаратной части АСУ, учитывающая потери, связанные с отказами и восстановлениями. В структуре второго множителя  $H_{пр}$  выделены и отражены в формализованном виде факторы, влияющие на ошибки программного кода, важнейшими из которых являются сложность программы, оцениваемая числом функциональных точек, и размер программы. Количественные значения факторов должны оцениваться в виде прогноза по тренду данных о выявленных ошибках на имитационной модели (разработка последней должна входить составной частью общего проекта).

В построении показателя надежности хранения данных  $H_{д}$  участвуют безразмерные коэффициенты средней заполненности хранилищ (без учета страховочного дублирования данных), коэффициент покрытия данных корректирующими и исправляющими процедурами, а также процент заблокированных модельных атак на СХД.

Предложенная методика может быть использована для интегрированной оценки надежности уже действующего автоматизированного управления систем водного транспорта с тем изменением, что модельная статистика заменяется фактически накопленной. Как и в других аналогичных ситуациях построения системных оценок, в случае интегрированного показателя проектной надежности АСУ следует считать не абсолютное ее значение, полученное на одном из вариантов проекта, а сопоставление оценок для альтернативных вариантов, полученных по единой методике.

### Заключение (Conclusion)

Разработка методики количественной общесистемной оценки надежности АСУ большими объектами воднотранспортной инфраструктуры на стадии их проектирования является актуальной научной проблемой, которая до настоящего времени не получила окончательного решения. Наличие подобной методики позволяет объективно оценивать укрупненные альтернативные варианты и уточнять оценки по мере продвижения проекта.

Предложенная методика основана на математических теоретико-вероятностном и оптимизационном моделировании. В основе ее заложен систематически используемый принцип мультипликативного агрегирования частных показателей, решающий вопросы унификации размерности. Выделены три аспекта, с различных сторон характеризующие общую надежность: надежность аппаратного контура, надежность программного обеспечения и надежность хранения данных в условиях удаленных СХД и облачных технологий. Для каждого из этих аспектов предложен набор существенных факторов, допускающих количественное выражение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химмельблау Д. М. Прикладное нелинейное программирование / Д. М. Химмельблау. — М.: Мир, 1975. — 536 с.
2. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод градиентного спуска / А. В. Гасников. — М.: МЦНМО, 2021. — 272 с.
3. Ястребов И. М. Управление рисками при разработке программного обеспечения в области защиты информации / И. М. Ястребов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114. — EDN ULIUUE.
4. Дал У. Структурное программирование / У. Дал, Э. Дейкстра, К. Хоор. — М.: Мир, 1975. — 247 с.
5. Голоскоков К. П. Моделирование транспортно-технологических процессов в автоматизированных системах / К. П. Голоскоков, Н. Б. Глебов, А. А. Астапкович // Вестник государственного университета

морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 154–162. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162. — EDN NHWYWB.

6. *Голоскоков К. П.* Определение оптимального периода контроля вычислений в комплексах программ автоматизированных систем управления / К. П. Голоскоков, В. В. Коротков, А. А. Астапкович // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 885–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892. — EDN DYDCRJ.

7. *Стрелавина О. Д.* Повышение надежности программного обеспечения для распределенных систем управления / О. Д. Стрелавина, С. Н. Ефимов, В. А. Терсков, М. А. Лихарев // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2021. — Т. 22. — № 3. — С. 459–467. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-3-459-467. — EDN SOQXMM.

8. *Найханова Л. В.* Расчет сложности программного продукта методом функциональных точек / Л. В. Найханова, С. В. Дамбаева, М. А. Пыкин // Научные исследования. — 2017. — Т. 1. — № 6(17). — С. 12–16. — EDN YPMQOX.

9. *Гуз И. Д.* Анализ эксплуатационной надежности оборудования систем хранения данных / И. Д. Гуз, В. А. Острейковский // Вестник кибернетики. — 2019. — № 3(35). — С. 35–42. DOI: 10.34822/1999-7604-2019-3-35-42. — EDN ZNASNT.

10. *Звонарева А. А.* Основные аспекты надежности программного обеспечения систем управления / А. А. Звонарева, А. О. Толоконский // Вестник Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”. — 2021. — Т. 10. — № 5. — С. 429–435. DOI: 10.1134/S2304487X21050126. — EDN HZYDBT.

11. *Михалевич И. Ф.* Концептуальные проблемы транспортной безопасности водных интеллектуальных транспортных систем / И. Ф. Михалевич // Надежность. — 2024. — Т. 24. — № 2. — С. 72–87. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87. — EDN CNEDVC.

12. *Нетес В. А.* Типичные недостатки в публикациях по надежности / В. А. Нетес // Надежность. — 2025. — Т. 25. — № 1. — С. 40–45. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-40-45. — EDN DVKYBN.

13. *Гладких Т. Д.* Модель надежности автоматизированной системы управления технологическим процессом / Т. Д. Гладких // Современные наукоемкие технологии. — 2023. — № 2. — С. 30–35. DOI: 10.17513/snt.39520. — EDN LDBRSQ.

## REFERENCES

- Himmelblauy D. M. *Applied nonlinear programming*. Moscow: Mir, 1975: 536.
- Gasnikov A. V. *Modern Numerical Optimization Methods. Gradient Descent Method*. M.: MCNMO, 2021: 272.
- Yastrebov, I. M. “Risk management in software development in the field of information protection.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114.
- Dahl, O. -J., E. W. Dijkstra, and C.A.R. Hoare *Structured Programming*. Moscow: Mir, 1975: 247.
- Goloskokov, K. P., N. B. Glebov and A. A. Astapkovich. “Modeling of transportation and technological processes in automated systems.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 154–162. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162.
- Goloskokov, K. P., V. V. Korotkov and A. A. Astapkovich. “Determination of the optimal period for computations control in complexes of automated control systems programs.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 885–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-885-892.
- Strelavina, O. D., S. N. Efimov, V. A. Terskov and M. A. Likharev. “Increasing software reliability of a distributed control systems.” *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal* 22.3 (2021): 459–467. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-3-459-467.
- Naykhanova, L. V., S. V. Dambaeva and M. A. Pykin. “Raschet slozhnosti programmogo produkta metodom funktsional’nykh tochek.” *Nauchnye issledovaniya* 1.6(17) (2017): 12–16.
- Guz, I. D. and V. A. Ostreykovskiy. “Operational reliability analysis of hardware of data storage systems.” *Vestnik kibernetiki* 3(35) (2019): 35–42. DOI: 10.34822/1999-7604-2019-3-35-42.
- Zvonareva, A. A. and A. O. Tolokonkiy. “Basic aspects of the reliability of control system software.” *Vestnik Natsional’nogo issledovatel’skogo yadernogo universiteta MIFI* 10.5 (2021): 429–435. DOI: 10.1134/S2304487X21050126.
- Mikhalevich, I. F. “Kontseptual’nye problemy transportnoy bezopasnosti vodnykh intellektual’nykh transportnykh sistem.” *Dependability* 24.2 (2024): 72–87. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87.

12. Netes, V. A. “Typical shortcomings in the dependability-related publications.” *Dependability* 25.1 (2025): 40–45. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-40-45.

13. Gladkikh, T. D. “The dependability model of the industrial control system.” *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* 2 (2023): 30–35. DOI: 10.17513/snt.39520.

---

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Коротков Виталий Валерьевич** —  
доцент кафедры комплексного обеспечения  
информационной безопасности ГУМРФ  
им. адмирала С. О. Макарова  
198035, Россия, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, д. 5/7.  
e-mail: korotkovvv@gumrf.ru

---

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Korotkov Vitaliy Valeryevitch** —  
assistant professor of Department of Integrated  
Information Security,  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
Dvinskaya street, 5/7, 198135, Saint Petersburg, Russia  
e-mail: korotkovvv@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 19 марта 2025 г.*

*Received: Mar. 19, 2025.*



Научное издание

# **Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Том 17. № 3**

**2025 год**

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*  
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать 27.06.25. Дата выхода в свет 30.06.25  
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 19,75.  
Тираж 500 (первый завод 40) экз. Свободная цена. Заказ № 281/25

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