

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. № 4**

**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. — № 4. — 162 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



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

**Гл. редактор**

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

**Зам. гл. редактора**

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

**Члены  
редакционной  
коллегии:**

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

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

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

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

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

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

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ  
СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ ..... 467**

*Васьков А. С., Мироненко А. А.* Контроль движения судна  
сопровождением пар ориентиров ..... 467

*Дерябин В. В.* Определение долготы места судна по глубинам  
на основе нейронной сети ..... 481

*Изотов О. А., Полуботко Н. С., Марушкина Е. Е.* Применение  
аппарата теории массового обслуживания при организации  
перевалки насыпных грузов на контейнерном терминале ..... 493

*Заслонов В. В., Жук С. С., Ольховик Е. О.* Разработка основных  
требований к системам функционирования буксира-автомата  
для проводки морского автономного надводного судна ..... 502

*Ююкин И. В.* Исследование дифференциальных свойств  
навигационной изоповерхности ..... 515

*Головина А. А., Сенченко В. Г., Айзинов С. Д.* Разработка требований  
к персоналу для работы системы обеспечения автоматической  
проводки и швартовки судов морского порта ..... 534

*Красюк А. Б., Буцанец А. А.* Исследование вопроса возможности  
дальнейшей эксплуатации танкеров типа «Волгонефть»  
при условии своевременного качественного ремонта ..... 545

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА  
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ..... 558**

*Ушаков К. М., Яцук Ю. В., Писаренко А. Б.* Влияние дифферента  
и осадки высокоскоростного катамарана на величину  
коэффициента остаточного сопротивления ..... 558

*Царик Р. С.* Анализ конструктивных и гидростатических  
характеристик судов-контейнеровозов в контексте их изменения  
на продольном волнении ..... 567

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) ..... 584**

*Соболенко А. Н., Горелик Г. Б., Чистяков А. Ю.* Исследование проблемы снижения величины обменных перетоков электрической мощности между параллельно работающими дизель-генераторами переменного тока ..... 584

*Юр Г. С., Губин Е. С.* Расчет и анализ относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и маловязкого судового топлива ..... 592

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ ..... 599**

*Сахаров В. В., Чертков А. А., Каск Я. Н.* Синтез и моделирование системы управления электроприводом на основе эталонной модели нейронного регулятора ..... 599

*Ныркoв А. П., Коротков В. В., Гаскаров В. Д.* Формализация структурной сложности программного обеспечения автоматизированной системы управления как фактора проектной оценки его надежности ..... 613



## CONTENTS

### OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 467

*Vas'kov A. S., Mironenko A. A.* Vessel tracking by landmark bases ..... 467

*Deryabin V. V.* Depth-aided prediction of a vessel's longitude using  
a neural network..... 481

*Izotov O. A., Polubotko N. S., Marushkina E. E.* Application  
of queuing theory in the organization of bulk cargo transshipment  
at a container terminal..... 493

*Zaslonov V. V., Zhuk S. S., Ol'khovik E. O.* Development of main  
requirements for the operating systems of an automatic tugboat  
for escorting a maritime autonomous surface ship ..... 502

*Yuyukin I. V.* Research of the differential properties of the navigational  
isosurface ..... 515

*Golovina A. A., Senchenko V. G., Ayzinov S. D.* Requirements  
for personnel of the system for providing automatic piloting  
and mooring of vessels in the seaport..... 534

*Krasiuk A. B., Butsanets A. A.* On the possibility of continuing  
to operate Volgoneft-type tankers, provided that they undergo timely,  
high-quality repairs ..... 545

### TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 558

*Ushakov K. M., Yatsuk Yu. V., Pisarenko A. B.* Effect of a high-speed  
catamaran trim and draft on the value of residual  
resistance coefficient ..... 558

*Tsarik R. S.* Analysis of the structural and hydrostatic characteristics  
of container ships in the context of their changes  
in longitudinal waves ..... 567

### SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 584

*Sobolenko A. N., Gorelik G. B., Chistyakov A. Yu.* To the problem  
of reducing the amount of exchange electric power flows between

Volume 17. № 4

2025

#### EDITORIAL BOARD

*S. O. Baryshnikov*  
Doctor of Technical Sciences

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

#### Members of the editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

parallel-operating diesel generators of alternating current ..... 584  
*Yur G. S., Gubin E. S.* Calculation and analysis of relative atomization  
characteristics of diesel distillate and low-viscosity marine fuel..... 592

**AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL  
PROCESSES AND PRODUCTIONS ..... 599**

*Saharov V. V., Chertkov A. A., Kask Ya. N.* Synthesis and modeling  
of the electric drive control system based on the reference model  
of the neural regulator ..... 599

*Nyrkov A. P., Korotkov V. V., Gaskarov V. D.* Formalization  
of the structural complexity of software as a factor  
in the design assessment of its reliability..... 613

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-467-480

EDN BIKRYA

## VESSEL TRACKING BY LANDMARK BASES

**A. S. Vas'kov<sup>1</sup>, A. A. Mironenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Admiral Ushakov State Maritime University,  
Novorossisk, Russian Federation

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

*This work continues exploratory research aimed at improving methods using isolines of key navigation parameters traditionally applied in coastal navigation. The previously proposed idea of combining isolines for a single landmark base based on measured bearings and distances has been extended to multiple landmark bases, with tracking of four landmarks considered the basic option. Assuming the presence of irregular and regular measurement errors, regular errors are first compensated by transitioning to differential isolines in a general form. Next, the isolines or position line equations are presented in a reduced standard form and then solved using the least squares method. To compare different solutions, the accuracy of the obtained fixed position is estimated by the radial error. It is shown that regular errors are compensated when position lines are presented in a reduced standard form, but their reduction also allows compensating residual effects caused by the computational procedure. The most important findings of the research are visualized, and the main expressions are practically applied in the software of modern navigation systems. Simulation has shown that the radial error of the fixed vessel position, calculated from 26 reduced position lines presented in the standard form for four landmarks, is nearly twice less than the requirement for GNSS systems. Formalization of the proposed methods in state-of-the-art navigation systems and autonomous vessels will allow solving navigation information processing problems in coastal navigation at a new qualitative level.*

*Keywords: navigation parameter, range arc, isoazimuth, ellipse, hyperbola, position line, reduced standard form, least squares method, fixed position, radial error.*

### For citation:

Vas'kov, Anatoliy S., and A. A. Mironenko. "Vessel tracking by landmark bases." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.4 (2025): 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-467-480.

**УДК 656.61.052.4**

## КОНТРОЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА СОПРОВОЖДЕНИЕМ ПАР ОРИЕНТИРОВ

**А. С. Васьков<sup>1</sup>, А. А. Мироненко<sup>2</sup>**

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

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

*В работе продолжены поисковые изыскания в части совершенствования методов использования изолиний основных навигационных параметров традиционных для практического судовождения в условиях плавания вблизи берегов. Ранее предложенная идея комбинаций изолиний для одной пары навигационных ориентиров по измеренным пеленгам и дистанциям получила развитие на основе анализа нескольких пар ориентиров. В качестве базового варианта рассматривается сопровождение четырех ориентиров. В предположении общего случая наличия случайных и систематических погрешностей в измерениях вначале компенсируются возможные систематические погрешности переходом к разностным изолиниям, которые затем представляются в общем виде и производится их редуцирование. Далее для совместного решения избыточных уравнений линий положения методом наименьших квадратов они приводятся к нормальному виду, т. е. используются единые размерности.*

Точность получаемых обсервованных координат для сравнения различных вариантов решения оценивается радиальной погрешностью. Показано, что в разностных линиях положения систематическая погрешность компенсируется, но редуцирование позволяет компенсировать их остаточное влияние, вызванное вычислениями. Важнейшие положения проведенного исследования визуализированы, а приводимые выражения доведены до формы практического применения в программном обеспечении современных систем навигации. Компьютерное моделирование показало, что радиальная погрешность координат обсервованного местоположения судна по 26 редуцированным линиям положения комбинаций пеленгов и дистанций четырех ориентиров практически в два раза меньше регламентированной для ГНСС. Формализация предлагаемых методов в современных навигационных комплексах и системах управления автономными судами позволит судоводителю решать задачи обработки навигационной информации в прибрежных районах плавания на качественно новом уровне.

**Ключевые слова:** навигационный параметр, изостадия, изопеленг, эллипс, гипербола, линия положения, редуцирование, метод наименьших квадратов, обсервованное место судна, радиальная погрешность.

#### Для цитирования:

Васьков А. С. Контроль движения судна сопровождением пар ориентиров / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-467-480. — EDN BIKRYA.

### Введение (Introduction)

В исследовании [1] приводится детальный анализ сопровождения одной пары навигационных ориентиров с характерными параметрами базы (направление и дистанция между ориентирами) при помощи РЛС – САРП. По мнению авторов исследований [1, 2], предлагаемая реализация обеспечит более надежное опознание навигационных ориентиров ввиду уникальности параметров каждой отдельной базы в конкретном районе плавания, а следовательно, всей навигационной обстановки в целом, а также непрерывное получение избыточного количества навигационных параметров (НП) для целей оперативного контроля процесса движения судна по программной траектории (ПТ). Одновременное совместное измерение пеленгов и дистанций одной пары навигационных ориентиров техническими средствами судовождения (ТСС) при их автоматическом сопровождении позволяет получить семь избыточных изолиний для определения высокоточного обсервованного места судна (ОМС).

Целью исследования является анализ возможности одновременного применения нескольких пар навигационных ориентиров для контроля движения судна и определения координат ОМС.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Уравнения избыточных изолиний, а также градиенты навигационных параметров в системе прямоугольных координат с центром в базе ориентиров имеют вид [1, 3–7]:

1. Изолиний окружностей (изостадии по обсервованным дистанциям, и изогона по разности двух измеренных пеленгов):

$$x_i^2 + y_i^2 = R_i^2; R_i = (D_1, D_2) = \text{const};$$

$$\tau_D = \Pi_{1,2} \pm 180^\circ; g_D = 1; \quad (1)$$

$$\gamma = |\Pi_1 - \Pi_2| = \text{const}; R = \frac{d}{2 \sin \gamma}; g_\gamma = 57,3 \frac{d}{D_1 D_2}; \tau_\gamma = \Pi_1 + \arctg \frac{D_2 - D_1 \cos \gamma}{D_2 \sin \gamma}, \quad (2)$$

где  $D_1, D_2, d$  — обсервованные дистанции и базовое расстояние, мили;

$x_i, y_i; R$  — прямоугольные координаты ориентиров и радиус окружности, мили;

$\Pi_1, \Pi_2, \gamma$  — обсервованные пеленги, горизонтальный угол между ориентирами;

$\tau_D, \tau_\gamma, g_D, g_\gamma$  — направления и модули соответствующих градиентов.

2. Изолинии прямых пеленгов — изопеленги:  $\Pi_i = (\Pi_1, \Pi_2) = \text{const}$ :

$$\Pi_i = \arctg \frac{y_i - y_c}{x_i - x_c} = \text{const}; g_{n(1,2)} = \frac{57,7^\circ}{D_{1,2}}, [^\circ/\text{мили}]; \tau_{n(1,2)} = \Pi_i - 90^\circ, \quad (3)$$

где  $x_c, y_c$  — прямоугольные счислимые координаты судна (СМС), мили;

$\tau_{n(1,2)}; g_{n(1,2)}$  — направления и модули градиентов пеленгов,  $^\circ, ^\circ/\text{мили}$ .

3. Изолиния разности дистанций – гипербола –  $\Delta D = D_1 - D_2 = \text{const}$ :

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad a = \frac{\Delta D}{2} = \text{const}; \quad b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2};$$

$$\tau_{\Delta D} = \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{2} \pm 90^\circ; \quad g_{\Delta D} = \left| 2 \sin \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{2} \right|, \quad (4)$$

где  $a, b$  — действительная и мнимая полуоси гиперболы;

$\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}$  — направление и модуль градиента разности дистанций,  $^\circ$ .

4. Изолиния суммы дистанций – эллипс –  $\Sigma D = D_1 + D_2 = \text{const}$ :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad a = \frac{D_1 + D_2}{2} = \text{const}; \quad b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}};$$

$$\tau_{\Sigma D} = \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{2} \pm 180^\circ; \quad g_{\Sigma D} = \left| 2 \cos \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{2} \right|, \quad (5)$$

где  $a, b$  — большая и малая полуоси эллипса;

$\tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$  — направление и модуль градиента суммы дистанций,  $^\circ$ .

В практическом судовождении неизбежные погрешности в измерениях навигационных параметров, а следовательно, и погрешности в изолиниях — линиях положения (ЛП) и в целом в обсервованных координатах принято уменьшать рациональным выбором пары ориентиров, при которой модули градиентов (1)–(5) принимают наибольшие значения, т. е. обеспечивают минимальные значения средней квадратической погрешности (СКП) ЛП [3–7]:

$$m_{\text{ЛП},i} = m_i / g_i,$$

где  $m_{\text{ЛП},i}, m_i$  — СКП ЛП и измерений.

Для градиентов горизонтального угла, пеленга и разности дистанций из (2)–(4) следует, что такому условию соответствует пара ориентиров, база которой ближе к позиции судна [3–7]. В то же время для градиента изолинии эллипса (5) при приближении базового угла к  $180^\circ$  модуль градиента стремится к нулю, возрастает СКП ЛП. Если рассматривать комбинации изолиний, то пересечение изолиний (ЛП) пеленгов и дистанций по каждому из ориентиров, а также ЛП софокусных эллипсов (5) и гипербол (4) находится всегда под углом  $90^\circ$ , что максимально уменьшает влияние погрешностей измерений НП на погрешности в координатах ОМС.

Анализ возможности одновременного применения нескольких пар навигационных ориентиров для контроля движения судна и определения координат ОМС обеспечит формирование не только ПТ, но и в единообразном подходе гарантированную полосу проводки (ГПП) в прибрежном плавании и стесненных водах в виде семейства кусочно-непрерывной последовательности изолиний НП, измеряемых современными ТСС. Единообразная концепция представления ПТ, ГПП и навигационных ориентиров может быть реализована в виде сложной обобщенной граф-модели [8], например, для ПТ и средств навигационного обеспечения (СНО) — рис. 1:

$$G_{\text{ПТ}} = (WP, S); \quad G_{\text{НО}} = (RP, B),$$

где  $G_{\text{ПТ}}$  — граф ПТ;

$WP$  — вершины графа ПТ — путевые точки, статуса (ТНП, ТКП, ТВЛ и т. п.);

$S$  — ребра графа;

$G_{\text{НО}}$  — граф СНО;

$RP$  — вершины графа СНО (навигационные ориентиры);

$B$  — ребро графа СНО (параметры базы (направление и расстояние)).

Вершины графов — путевые точки с географическими координатами ( $\varphi, \lambda$ ), по смыслу будут соответствовать точкам приложения силовых воздействий (винт, руль, буксиры), удерживающих судно на ПТ с плановой скоростью, компенсирующих воздействия внешних сил (ветер, течение



и т. п.), или точкам статуса начала и конца поворота (ТНП, ТКП), встречи лоцмана (ТВЛ), навигационным ориентирам, их виду (визуальному, радиолокационному и т. п.). Ребра графов будут представлять отрезки локсодромий ПТ, расстояния, а также кривые второго порядка, аппроксимирующие криволинейные участки ПТ или реализованные в виде сигмоподобных траекторных функций (СТФ) параметры баз ориентиров (направление, дистанция).

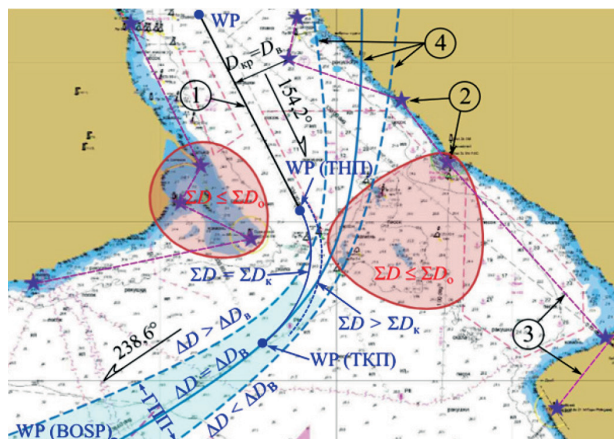


Рис. 1. Схема графов ПТ и используемых НО:

- 1 — граф ПТ с вершинами  $WP$ ,  $WP$  (ТНП),  $WP$  (ТКП) и ребрами  $S$  (локсодромии с контролем по  $D_{кр}$ ,  $WP$  (ТНП) –  $WP$  (ТКП) — поворот по дуге эллипса с контролем по сумме дистанций  $\Sigma D_k$ ,  $WP$  (ТНП) –  $WP$  (BOSP) — дуга гиперболы выхода в ГПП с контролем по разности дистанций пар ориентиров  $\Delta D_b$ );
- 2 — навигационные ориентиры: визуальные, радиолокационные, створы и т. п. (вершины графа);
- 3 — базы ориентиров (ребра графа) в порядке открытия вдоль ПТ;  
 $WP$  (BOSP) — путевая точка (начало морского перехода);
- $D_b, D_o, D_{кр}$  — соответственно дистанции ведущие, ограждающие, кратчайшие;
- 4 — «неходовая» часть, ограниченная семейством гипербол

При планировании ПТ судоводителем вручную могут подбираться пары навигационных ориентиров, однако перспективное использование специальных программных приложений при условии их реализации и интегрирования в РЛС – САРП и ECDIS будет служить дополнительной поддержкой развития методов и средств судовождения перспективных морских автономных надводных судов (МАНС) в стесненных условиях плавания. Применение изолиний с постоянной и переменной кривизной позволит обеспечить не только оперативный контроль движения судна по криволинейным участкам ПТ с учетом угловой скорости поворота во взаимосвязи с линейной скоростью относительно грунта по запланированному радиусу кривизны ПТ, но и удержание его в пределах геометрии ограничений ГПП [9, 10].

Разности исходных НП (пеленгов и дистанций), косвенно образующих новые НП и соответствующие изолинии (изогону и гиперболу), позволяют непосредственно компенсировать постоянные систематические погрешности измерений исходных НП, а избыточность изолиний способствует уменьшению влияния случайных погрешностей.

При наличии в навигационной обстановке более двух ориентиров, которые можно взять на автосопровождение РЛС – САРП для контроля процесса движения судна по ПТ и получения ОМС может быть образовано несколько пар ориентиров. Например, сопровождение трех ориентиров (лучший вариант с позиций компенсации погрешностей при их расположении по всему горизонту) позволяет получить 15 избыточных изолиний:

- 1) шесть окружностей (по дистанциям — три изостадии и разностям пеленгов — горизонтальным углам между ориентирами — три изогоны);
- 2) три изопеленга — по пеленгам ориентиров;
- 3) три гиперболы — по разностям дистанций до двух ориентиров;

4) три эллипса, софокусные соответствующим гиперболам по суммам дистанций до двух ориентиров.

При измерении и сопровождении пеленгов и дистанций четырех ориентиров с наилучшим с позиций теории ОМС расположением по всему горизонту (рис. 2) образуется шесть пар ориентиров, чтократно увеличивает до 26 общее число прямых и косвенных изолиний (ЛП):

- 1) десять окружностей (по дистанциям — четыре изостадии и разностям пеленгов двух ориентиров — горизонтальным углам между ориентирами — шесть изогон);
- 2) по пеленгам ориентиров — четыре изопеленги;
- 3) по разностям дистанций до двух ориентиров — шесть гипербол;
- 4) по суммам дистанций до двух ориентиров — шесть эллипсов, софокусных соответствующим гиперболам.

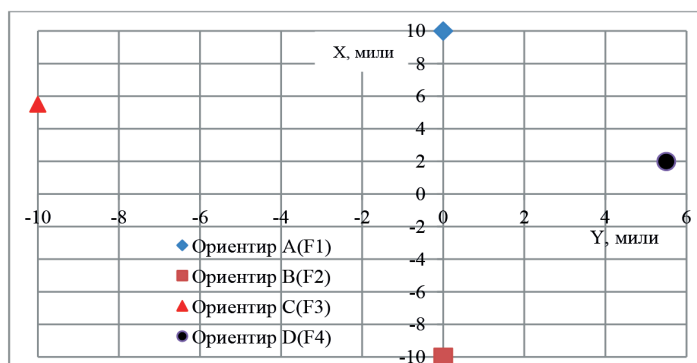


Рис. 2. Схема расположения навигационных ориентиров в системе прямоугольных координат:  $A(F1)$ ,  $B(F2)$ ,  $C(F3)$ ,  $D(F4)$  — ориентиры (соответствующие фокусы гипербол и эллипсов);  $X$ ,  $Y$  — прямоугольные координаты ориентиров, мили

Кроме приведенных изолиний, известных в навигации [3–7], образованных по исходным измеренным пеленгам и дистанциям и их комбинациям, могут быть получены новые типы изолиний, в частности семейство многофокусных кривых (многофокусный эллипс и многофокусная гипербола [11–14]), позволяющих, например, точнее и подробнее аппроксимировать контуры навигационных опасностей и запретных районов произвольной кривизны в целях контроля безопасности плавания судна (рис. 3) [12].

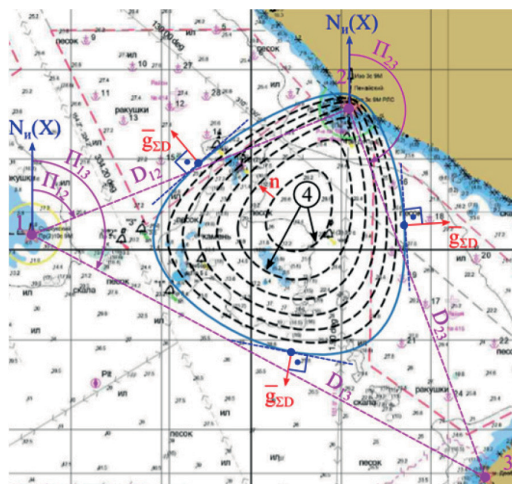


Рис. 3. Семейство изолиний трех фокусных эллипсов:  
1–3 — навигационные ориентиры;  
 $\Pi_{ij}$ ,  $D_{ij}$  — параметры баз пар ориентиров (пеленги, дистанции);  
 $n$  — перенос изолинии;  $g_{\Sigma D}$  — градиент НП суммы дистанций;  
4 — изолинии суммы дистанций

Это позволит сохранить больше контролируемого свободного пространства для маневрирования судна:

$$\sum_{i=1}^N \sqrt{(x - x_{F_i})^2 + (y - y_{F_i})^2} = \sum_{i=1}^N D_i = \text{const};$$

$$t_{\Sigma D} = \arctg \left( \frac{\sum_{i=1}^N \sin \tau_i}{\sum_{i=1}^N \cos \tau_i} \right); \quad g_{\Sigma D} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^N \sin \tau_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N \cos \tau_i \right)^2},$$

где  $x_{F_i}, y_{F_i}$  — координаты фокусов  $N$ -фокусного эллипса (координаты ориентиров);

$N$  — количество (число) ориентиров;

$D_i$  — дистанция от позиции судна (обсервованные) до соответствующего ( $i$ -го) ориентира;

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

Для определения места судна по избыточным изолиниям (ЛП) целесообразно применять программные приложения к РЛС – САРП или *ECDIS*, которые могут быть реализованы на основе обобщенного метода линий положения и метода наименьших квадратов (МНК) [3–7, 15].

При гипотезе присутствия в сопровождаемых пеленгах и дистанциях как случайных, так и систематических погрешностей (соответствует наиболее общему случаю) целесообразно вначале раздельно обрабатывать однородные по типу НП уравнения ЛП редуцированием коэффициентов их средними арифметическими значениями для компенсации и учета систематических погрешностей в последующих измерениях с помощью полученных поправок [1, 4, 16]. Для данной операции исходные уравнения ЛП следует представить в общем виде, чтобы исключить влияние разных по модулю градиентов на измеренные и счислимые значения НП:

$$a_i \Delta x + b_i \Delta y = \Delta U_i + V_i + \sigma; \quad \Delta U_i = U_{oi} - U_{ci};$$

$$a_i = g_i \cos \tau_i; \quad b_i = g_i \sin \tau_i; \quad (6)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \Delta x + \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \Delta y - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma}{n} = \sigma; \quad \Delta \text{НП} = -\sigma; \quad (7)$$

$$\left( a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \right) \Delta x + \left( b_i - \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \right) \Delta y = \left( \Delta U_i - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_i}{n} \right) + V_i; \quad (8)$$

$$g_i = \sqrt{\left( a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \right)^2 + \left( b_i - \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \right)^2}; \quad \tau_i = \arctg \left( \left( b_i - \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \right) / \left( a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \right) \right); \quad (9)$$

где  $\Delta x, \Delta y$  — поправки к координатам СМС для получения ОМС;

$a_i, b_i$  — коэффициенты однородных уравнений ЛП общего вида;

$\Delta U_i$  — разности обсервованных и счислимых значений НП;

$U_{oi}, U_{ci}$  — обсервованные и счислимые значения НП;

$g_i, \tau_i$  — модули и направления градиентов редуцированных уравнений ЛП (8);

$V_i$  — вероятнейшие случайные погрешности НП;

$\sigma$  — повторяющаяся систематическая погрешность однородных НП, подлежащая компенсации;

$n$  — количество однородных уравнений ЛП;

$\Delta \text{НП}$  — поправка соответствующих НП для исправления последующих измерений.

Несмотря на то, что в изолиниях, образованных разностью сопровождаемых НП ориентиров (пеленгов и дистанций), т. е. изогон и гипербол, компенсируется влияние постоянных систематических погрешностей исходных измерений [3–7], уравнения этих изолиний также целесообразно редуцировать для компенсации возможных постоянных остаточных погрешностей и вычислений. После этого редуцированные уравнения (РЛП) (8) с помощью их градиентов (9) представляются в нормальном виде для приведения единиц измерения исходных и косвенных НП к единой размерности (милям) при совместном решении всех уравнений ЛП по семейству пар ориентиров [3–7]:



$$\Delta x \cos \tau_i + \Delta y \sin \tau_i = l_i + V_i; \quad l_i = \Delta U_i / g_i, \quad (10)$$

где  $l_i$  — смещения ЛП относительно СМС, мили.

После применения МНК к системе всех  $n$ -уравнений ЛП (10) пар ориентиров (для трех пар ориентиров  $n = 17$ , для четырех —  $n = 26$ ) получается система двух нормальных уравнений (НЛУ) для определения двух вероятнейших поправок к СМС и расчета координат ОМС, например, по правилу Крамера:

$$\begin{cases} A_1 \Delta x + B_1 \Delta y = L_1; \\ A_2 \Delta x + B_2 \Delta y = L_2; \end{cases} \quad (11)$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^n P_i \cos^2 \tau_i; \quad B_1 = A_2 = \sum_{i=1}^n P_i \sin \tau_i \cos \tau_i; \quad B_2 = \sum_{i=1}^n P_i \sin^2 \tau_i; \\ L_1 = \sum_{i=1}^n P_i l_i \cos \tau_i; \quad L_2 = \sum_{i=1}^n P_i l_i \sin \tau_i; \quad P_i = m_{\text{ЛП}_i}^{-2}; \quad (12)$$

$$\Delta x = \frac{B_2 L_1 - B_1 L_2}{\Delta}; \quad \Delta y = \frac{A_1 L_2 - A_2 L_1}{\Delta}; \quad \Delta = A_1 B_2 - A_2 B_1; \quad (13)$$

$$x_0 = x_c + \Delta x; \quad y_0 = y_c + \Delta y,$$

где  $A_i, B_i, L_i$  — коэффициенты НЛУ (11);

$n, P_i$  — общее количество ЛП (10) по парам ориентиров, их вес;

$x_0, y_0$  — прямоугольные координаты ОМС, мили.

Радиальная СКП вероятнейшего ОМС оценивается через СКП ЛП с единичным весом, полученным по вероятнейшим поправкам относительно координат ОМС (10) после их определения (13), согласно следующему выражению:

$$M_o = m_1 \sqrt{\frac{A_1 + B_2}{\Delta}} = m_1 \sqrt{\frac{\sum P_i}{\Delta}}; \quad m_1 = \sqrt{\frac{\sum P_i (l_i - \Delta x \cos \tau_i - \Delta y \sin \tau_i)^2}{n - 2}}, \quad (14)$$

где  $m_1$  — СКП ЛП с единичным весом.

Решения системы уравнений (11)–(13) могут быть представлены в векторно-матричной форме [1, 4, 17–19], элементы которых формируются из составляющих исходных уравнений ЛП (10), что позволяет также исключить возможные проблемы, если главный определитель системы (13) равен нулю:

$$PA \Delta X = PL; \quad \Delta X = (A^T P A)^{-1} A^T P^{-1} L; \quad (15)$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}; \quad A^T = \begin{bmatrix} \cos \tau_1 \cos \tau_2 \dots \cos \tau_n \\ \sin \tau_1 \sin \tau_2 \dots \sin \tau_n \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \tau_1 & \sin \tau_1 \\ \cos \tau_2 & \sin \tau_2 \\ \dots & \dots \\ \cos \tau_n & \sin \tau_n \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{bmatrix}; \quad P = \begin{bmatrix} 1/m_{\text{ЛП}_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/m_{\text{ЛП}_2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/m_{\text{ЛП}_n}^2 \end{bmatrix},$$

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

$A, A^T$  — матрица коэффициентов ЛП (10) и транспонированная матрица;

$L$  — матрица-столбец переносов ЛП (10);

$P, P^{-1}$  — прямая и обратная матрицы весов ЛП (15).

Оценка точности полученных координат ОМС (15) производится на основе анализа ковариационной матрицы погрешностей измеренных НП при условии «усечения» ее до размерности до двух НЛУ ( $2 \times 2$ ), вне зависимости от количества НП, а именно [18]:

$$N = (A^T P A)^{-1}; \quad N = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{pmatrix}; \quad n_{11} \equiv m_{\Delta\varphi}^2; \quad n_{22} \equiv m_{\Delta\omega}^2, \quad (16)$$

где  $N$  — ковариационная матрица погрешностей;

$n_{11}, n_{22}$  — дисперсии СКП широты и отстояния для ОМС соответственно;

$n_{12} = n_{21}$  — ковариационные моменты.

По главной диагонали ковариационной матрицы в (16) находятся дисперсии координат ОМС по измеряемым НП, вне главной диагонали — ковариационные моменты, характеризующие связь между измерениями НП. Геометрическая интерпретация ковариационной матрицы в (16) для двумерного случая (плоскости) определяет основные параметры эллипса погрешностей: главные полуоси и углы ориентации. Для рассматриваемой ковариационной матрицы существуют собственные векторы, определяющие направления главных полуосей эллипса погрешностей (направления действия максимальной и минимальной погрешностей), а собственные числа (модули собственных векторов) максимальное и минимальное значения дисперсий. Собственные числа ковариационной матрицы в данном случае находятся на основе решения ее характеристического уравнения:

$$Nz = \zeta; \quad \zeta = \frac{n_{11} + n_{22} \pm \sqrt{(n_{11} - n_{22})^2 + 4n_{12}^2}}{2}; \quad \Psi = \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$\zeta_{\max} = m_{\text{ЛПmax}}^2; \quad \zeta_{\min} = m_{\text{ЛПmin}}^2,$$

где  $\Psi$  — вектор, определяющий составляющие направления собственного вектора (проекции на координатные оси ( $X$  — меридиан,  $Y$  — параллель на рис. 2);

$\psi$  — направление собственного вектора в круговом счете, относительно меридиана (оси  $X$ );

$\zeta$  — собственное число ковариационной матрицы в (16).

Подстановка элементов ковариационной матрицы погрешностей координат ОМС (16) в (17) дает собственные числа, а именно наибольшее значение дисперсии при знаке «+» и наименьшее значение дисперсии при знаке «-». Тогда полуоси среднеквадратического эллипса погрешностей ( $a, b$ ) — рис. 4 (максимальная и минимальная среднеквадратические погрешности в ОМС) — определяются квадратными корнями из дисперсий, т. е. соответствующих собственных чисел:

$$a = \sqrt{\zeta_{\max}}; \quad b = \sqrt{\zeta_{\min}}. \quad (18)$$

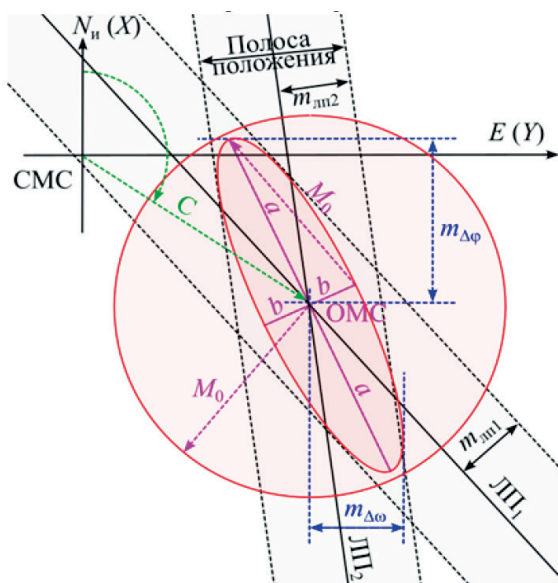


Рис. 4. Среднеквадратический эллипс погрешностей и радиальная СКП ОМС

Направление собственных векторов (полуосей эллипса погрешностей) получается взаимным преобразованием выражений (18) с учетом составляющих ковариационной матрицы погрешностей (17):

$$\psi = \arctg \frac{\zeta - n_{11}}{n_{12}}. \quad (19)$$

Радиальная СКП ОМС ( $M_o$ ) рассчитывается как корень квадратный из следа ковариационной матрицы (17) либо с помощью СКП по широте и отшествию ОМС (16), либо с помощью найденных главных полуосей эллипса погрешностей (18) — см. рис. 4:

$$M_o = \sqrt{n_{11} + n_{22}} = \sqrt{m_{\Delta\varphi}^2 + m_{\Delta w}^2} = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (20)$$

Таким образом, системы уравнений (11)–(14) и (15)–(20) дают эквивалентные результаты (координаты) ОМС и радиальные СКП. Различие заключается в форме математического представления одной и той же задачи ОМС с оценкой точности, а также возможностей программной реализации в зависимости от вычислительных устройств.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Работоспособность методов и алгоритмов апробировалась компьютерным моделированием, для этого производилась обработка избыточных НП пар четырех ориентиров, координаты которых снимались с плана (планшета) — см. рис. 2 — и уточнялись решением соответствующих локсодромических треугольников. СКП принимались по априорным статистическим данным [1, 18, 19]. Исходные данные сведены в таблицу.

**Исходные данные определения вероятнейших координат ОМС судна по совместным парам четырех ориентиров**

| Пара<br>ориентиров                 | Пеленг, °             |                       | Дистанция,<br>мили           |                              | Угол, ° |                       | Δ <i>D</i> , мили |                               | Σ <i>D</i> , мили |                               | База, мили | Координаты,<br>мили |          |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|---------|-----------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------|---------------------|----------|
|                                    | Π <sub><i>i</i></sub> | <i>m</i> <sub>Π</sub> | <i>D</i> <sub><i>i</i></sub> | <i>m</i> <sub><i>D</i></sub> | γ       | <i>m</i> <sub>γ</sub> | Δ <i>D</i>        | <i>m</i> <sub>Δ<i>D</i></sub> | Σ <i>D</i>        | <i>m</i> <sub>Σ<i>D</i></sub> | <i>d</i>   | <i>x</i>            | <i>y</i> |
| <i>A</i> ( <i>F</i> <sub>1</sub> ) | 45,0                  | 0,5                   | 5,66                         | 0,015                        | 121,0   | 0,7                   | 10,83             | 0,02                          | 22,15             | 0,02                          | 20,00      | 10,00               | 0,00     |
| <i>B</i> ( <i>F</i> <sub>2</sub> ) | 166,0                 |                       | 16,49                        |                              |         |                       |                   |                               |                   |                               |            | −10,00              | 0,00     |
| <i>A</i> ( <i>F</i> <sub>1</sub> ) | 45,0                  |                       | 5,66                         |                              | 139,7   |                       | 0,36              |                               | 11,68             |                               | 10,96      | 10,00               | 0,00     |
| <i>C</i> ( <i>F</i> <sub>3</sub> ) | 265,2                 |                       | 6,02                         |                              |         |                       |                   |                               |                   |                               |            | 5,5                 | −10,0    |
| <i>A</i> ( <i>F</i> <sub>1</sub> ) | 45,0                  |                       | 5,66                         |                              | 67,9    |                       | 4,64              |                               | 15,96             |                               | 9,71       | 10,00               | 0,00     |
| <i>D</i> ( <i>F</i> <sub>4</sub> ) | 112,8                 |                       | 10,30                        |                              |         |                       |                   |                               |                   |                               |            | 2,00                | 5,50     |
| <i>B</i> ( <i>F</i> <sub>2</sub> ) | 166,0                 |                       | 16,49                        |                              | 99,3    |                       | 10,48             |                               | 22,52             |                               | 10,96      | −10,00              | 0,00     |
| <i>C</i> ( <i>F</i> <sub>3</sub> ) | 265,2                 |                       | 6,02                         |                              |         |                       |                   |                               |                   |                               |            | 5,5                 | −10,0    |
| <i>B</i> ( <i>F</i> <sub>2</sub> ) | 166,0                 |                       | 16,49                        |                              | 53,1    |                       | 6,20              |                               | 26,80             |                               | 13,20      | −10,00              | 0,00     |
| <i>D</i> ( <i>F</i> <sub>4</sub> ) | 112,8                 |                       | 10,30                        |                              |         |                       |                   |                               |                   |                               |            | 2,00                | 5,50     |
| <i>C</i> ( <i>F</i> <sub>3</sub> ) | 265,2                 |                       | 6,02                         |                              | 152,4   |                       | 4,28              |                               | 16,32             |                               | 15,89      | 5,5                 | −10,0    |
| <i>D</i> ( <i>F</i> <sub>4</sub> ) | 112,8                 |                       | 10,30                        |                              |         |                       |                   |                               |                   |                               |            | 2,00                | 5,50     |
| СМС                                | —                     | —                     | —                            | —                            | —       | —                     | —                 | —                             | —                 | —                             | —          | 6,00                | −4,00    |

Для сопоставления и анализа на планшете (рис. 5) приведены результаты компьютерного моделирования для определения вероятнейших координат ОМС при различных сочетаниях НП, графики значений радиальных погрешностей ОМС показаны на рис. 6, что позволяет сделать выводы, характерные для различных сочетаний ЛП.

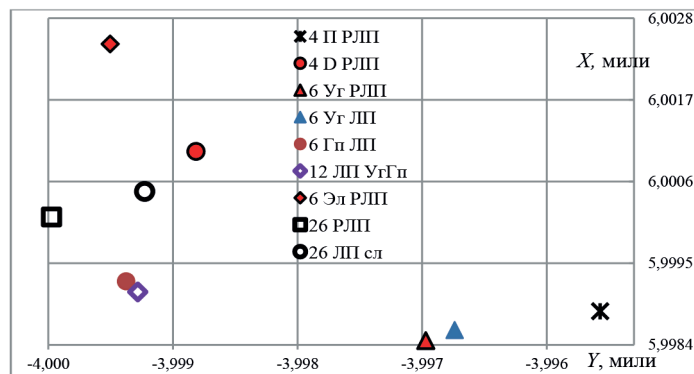


Рис. 5. Результаты определения вероятнейших координат ОМС по сочетаниям НП пар четырех ориентиров, расположенных по всему горизонту:  
П — пеленги; D — дистанции; Уг — горизонтальные углы;  
Гп — разности дистанций (изолинии гиперболы);  
Эл — суммы дистанций (изолинии эллипсы); ЛП — исходные ЛП в нормальном виде;  
РЛП — ЛП после редуцирования в нормальном виде;  
ЛП<sub>сл</sub> — исходные ЛП в нормальном виде при гипотезе только случайных погрешностей

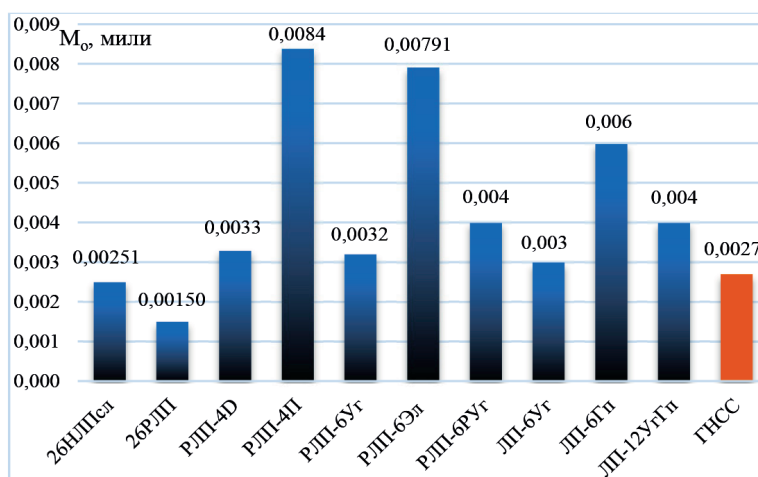


Рис. 6. Радиальные СКП вероятнейших координат ОМС по сочетаниям НП пар четырех ориентиров

Значения вероятнейших координат ОМС, полученных по одной итерации возможных 26 РЛП, практически совпадают с исходным местом ( $X = 6$ ,  $Y = -4$ ), из которого снимались с карты (измерялись и для контроля рассчитывались) НП (пеленги и дистанции) ((26 РЛП на рис. 5 и 6,  $M_0 = 0,0015$  мили). Систематические погрешности моделировались в пределах  $\pm 1$  мили по дистанции и  $\pm 2^\circ$  по пеленгу, что показывает состоятельность применения метода РЛП для их компенсации в измеренных НП. Значения вероятнейших координат ОМС по одной итерации 26 ЛП при гипотезе отсутствия систематических и наличия только случайных погрешностей близки к исходному месту ( $X = 6$ ,  $Y = -4$ ) (26 ЛПсл на рис. 5 и 6,  $M_0 = 0,00251$  мили). Это также подтверждает возможность уменьшения влияния случайных погрешностей измерений НП при правильном выборе расположения ориентиров, т. е. по всему горизонту (практически в противоположных азимутах) [1, 18, 19].

Влияние методов редуцирования на обработку разностных ЛП (дистанций и пеленгов) с целью компенсации систематических погрешностей в измерениях НП (в разностях они компенсируются) приведены для сравнения значений вероятнейших координат ОМС по горизонтальным углам (6 УгЛП, 6 УгРЛП на рис. 5, 6 УгЛП на рис. 6,  $M_0 = 0,003$  мили, 6 УгРЛП,  $M_0 = 0,0032$  мили),

которые практически совпадают. Это показывает целесообразность и состоятельность применения разностных ЛП для компенсации систематических погрешностей измерений различных НП. Для сравнения также представлены отдельно вероятнейшие координаты ОМС по 12 разностным ЛП без редуцирования (разностей дистанций — гипербола и пеленгов — горизонтальных углов) (12 УГП на рис. 5, 12 ЛП УГП на рис. 6,  $M_0 = 0,004$  мили), которые близки к ОМС по 26 ЛП<sub>сл</sub> и 26 РЛП, что подтверждает эффективность использования разностных ЛП.

Радиальная СКП вероятнейшего ОМС получается наименьшей по 26 РЛП (см. рис. 6 26 РЛП,  $M_0 = 0,0015$  мили), но наибольшей по четырем РЛП пеленгов (4РЛП на рис. 6,  $M_0 = 0,0084$  мили) по сравнению с ОМС по горизонтальным углам, полученным по разностям значений пеленгов, из-за значений модулей их градиентов.

Результаты моделирования с использованием различных вариантов редуцирования исходных ЛП для компенсации систематических погрешностей и их оценки по выражениям (7) позволяют контролировать их наличие и компенсировать в последующих измерениях НП с помощью полученной поправки.

Вероятнейшие ОМС по пеленгам (4 П РЛП) и горизонтальным углам (6 У<sub>г</sub> РЛП, 6 У<sub>г</sub> ЛП) в большей степени отличаются от вероятнейших ОМС, полученных по различным вариантам 26 ЛП (26 ЛП<sub>сл</sub>, 26 РЛП) относительно исходного места, взятого за истинное, и имеют большие радиальные погрешности из-за исходных погрешностей измерений НП и их градиентов.

По сравнению с гарантированной точностью ГНСС, в соответствии с Резолюцией ИМО<sup>1</sup> для стесненных условий плавания, включая портовые воды (10 м (0,0054 мили) с вероятностью 95 % или СКП = 0,0027 мили), полученные вероятнейшие ОМС по 26 ЛП являются более точными, остальные — равнозначными, за исключением ОМС по пеленгам (РЛП-4П, РЛП-6Эл) — см. рис. 6.

Результаты компьютерного моделирования определения вероятнейших координат ОМС в различных сочетаниях НП с наихудшим расположением пар четырех ориентиров с одной стороны горизонта при тех же исходных координатах СМС ( $X = 6$ ,  $Y = -4$ ) для сравнения показаны на планшете рис. 7.

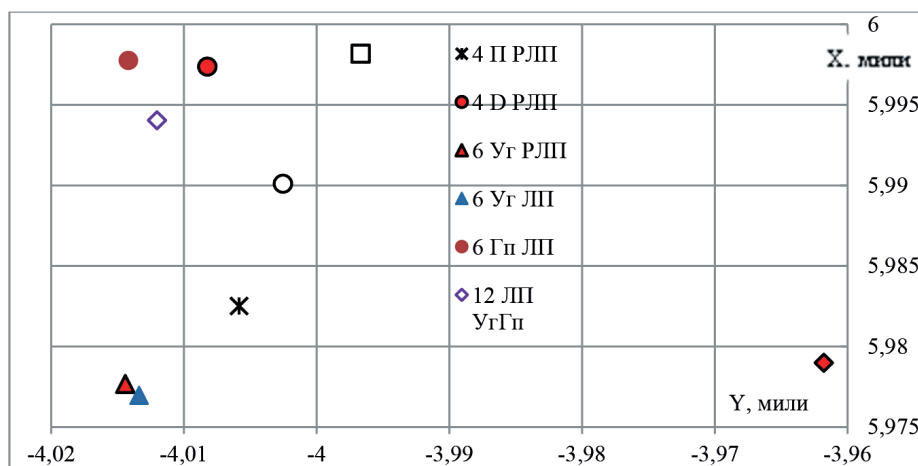


Рис. 7. Результаты определения вероятнейших координат ОМС по сочетаниям НП пар четырех ориентиров, расположенных с одной стороны горизонта

В данном случае процедуры редуцирования исходных уравнений ЛП также позволяют компенсировать систематические погрешности измерений НП в вероятнейших координатах ОМС по 26 РЛП (см. рис. 6). Радиальные СКП вероятнейших ОМС для различных комбинаций ОМС по 26 РЛП, в отличие от вариантов ОМС, связанных с измерениями пеленгов и их разностей, можно объяснить малыми значениями горизонтальных углов ввиду

<sup>1</sup> Resolution IMO A.1046(27) Worldwide radio navigation system / Adopted on 30 November 2011 (Agenda item 9).

специально смоделированного расположения навигационных ориентиров. Вероятнейшие координаты ОМС по РЛП суммы дистанций (эллипсов) в данном случае имеют значительное расхождение по отношению ко всем другим вариантам ОМС, хотя радиальная СКП ОМС аналогична предыдущему случаю. Это можно объяснить накоплением систематических погрешностей НП при суммировании дистанций, которые недостаточно компенсируются редуцированием исходных уравнений ЛП при расположении ориентиров с одной стороны горизонта.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реализация в современных ТСС: РЛС – САРП и *ECDIS* в виде дополнительного программного обеспечения принципов автоматического сопровождения и одномоментного измерения навигационных параметров (пеленгов и дистанций) пар ориентиров позволяет однозначно опознавать эти ориентиры по уникальным параметрам базы (см. рис. 3), в отличие от использования только одного ориентира, получая высокоточные координаты обсервованного местоположения.
2. Одновременное использование пар трех ориентиров с измерением и сопровождением пеленгов и дистанций дает 17 ЛП, четырех — 26 ЛП, что по сравнению с одной парой ориентиров дает лучшее расположение изолиний (ЛП) относительно опасностей и ПТ судна и, соответственно, повышает точность и надежность ОМС, а также безопасность плавания.
3. Компьютерное моделирование показывают хорошие результаты компенсации систематических погрешностей измерений НП и высокую точность по сравнению с требованиями к ОМС ГНСС (см. рис. 4) вероятнейших координат ОМС при любом расположении ориентиров относительно судна.
4. Для одновременного использования исходных НП (пеленгов и дистанций), а также косвенных НП (разностей или сумм исходных НП) в качестве ведущих, контрольных и ограждающих ЛП в соответствии с конкретным участком ПТ и навигационными условиями плавания следует разработать специальные схемы выбора пар ориентиров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьков А. С. Комбинации изолиний пеленгов и дистанций пары навигационных ориентиров для определения обсервованного места судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950. — EDN LUDOMV.
2. Афанасьев Б. В. Распознавание радиолокационных объектов с использованием внутренней геометрии полигона ориентиров / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев, С. С. Губернаторов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16. — EDN EOKKQV.
3. Песков Ю. А. Эволюция систем и методов морской радионавигации и связи для мониторинга движения судов / Ю. А. Песков // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2014. — № 2(7). — С. 42–44. — EDN QQBXXKF.
4. 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.
5. Груздев Н. М. Оценка точности морского судовождения / Н. М. Груздев — М.: Транспорт, 1989. — 191 с.
6. Санаев А. И. Аналитическое определение места судна в прибрежной зоне / А. И. Санаев, В. И. Меньшиков, М. А. Пасечников // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2002. — Т. 5. — № 2. — С. 195–202. — EDN IYBSF.
7. Практическое кораблевождение: для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Книга первая / Под ред. А. П. Михайловского. — СПб.: ГУНиО, 1889. — 896 с.
8. Мироненко А. А. Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна: диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук;



специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / Мироненко Александр Анатольевич; ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова. — Новороссийск, 2016. — 310 с. — EDN KUKJFE.

9. Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415. — DN THCPAN.

10. Васьков А. С. Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836. — EDN PLVFQU.

11. 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 OOHQL.

12. 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.

13. Ракчеева Т. А. Фокусная аппроксимация гладких геометрических форм / Т. А. Ракчеева // Актуальные научные проблемы прикладных и естественных наук: Сборник научных трудов кафедры прикладной математики и программирования. — Москва: ФГОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2018. — С. 188–202. — EDN RZZLJR.

14. Melzak Z. A., Forsyth J. S. Polyconics 1. Polyellipses and optimization / Z. A. Melzak, J. S. Forsyth // Quarterly of Applied Mathematics. — 1977. — Vol. 35. — Pp. 239–255.

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

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

17. Ефимов И. В. К вопросу об автоматизации определения места судна и оценки его точности / И. В. Ефимов, В. В. Касьянов // Морской вестник. — 2015. — № 3(55). — С. 67–71. — EDN UGCXBH.

18. Логиновский В. А. Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения / В. А. Логиновский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171. — EDN LALHQN.

19. Логиновский В. А. Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени / В. А. Логиновский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346. — EDN DDNVHE.

## REFERENCES

1. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The bearings and distances isolines combinations of the navigational landmarks pair for the vessel fixed position determination." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.6 (2023): 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950.

2. Afanas'ev, B. V., V. V. Afanas'ev and S. S. Gubernatorov. "Identification of the radar conspicuous objects using the internal geometry of the charted landmarks polygon." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.1 (2021): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16.

3. Peskov, Yu. A. "Evolution of maritime radionavigation and communications systems for monitoring of shipping." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admiral F. F. Ushakova* 2(7) (2014): 42–44.

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

5. Gruzdev, N. M. *Identification of the radar conspicuous objects using the internal geometry of the charted landmarks polygon* M.: Transport, 1989: 191.

6. Sanaev, A. I., V. I. Men'shikov and M. A. Pasechnikov. "Analiticheskoe opredelenie mesta sudna v pribrezhnoy zone." *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 5.2 (2002): 195–202.

7. Prakticheskoe korablevozhdenie: dlya komandirov korablej, shturmanov i vahtennyh oficerov. Kniga pervaya. Pod red. A. P. Mihajlovskogo. SPb.: GUNiO, 1889.
8. Mironenko, A. A. Metodologiya formalizatsii navigatsionnoy obstanovki, planirovaniya marshruta i programmnykh traektoriy dvizheniya sudna. Grand PhD diss. Novorossiysk, 2016, 310 p.
9. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "Planning and control of the ship curvilinear route." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
10. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The ship motion control by navigational parameters and parallel indexes." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.
11. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 3–1(61) (2023): 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.
12. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The multifocal ellipse ship's domain model." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 4–1(66) (2024): 259–266. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.031.
13. Rakcheeva, T. A. "Fokusnaya approksimatsiya gladkikh geometricheskikh form." *Aktual'nye nauchnye problemy prikladnykh i estestvennykh nauk: Sbornik nauchnykh trudov kafedry prikladnoy matematiki i programirovaniya* Moskva: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet imeni A. N. Kosygina (Tekhnologii. Dizayn. Iskusstvo)", 2018: 188–202.
14. Melzak Z. A. and J. S. Forsyth "Polyconics 1. Polyellipses and optimization." *Quarterly of Applied Mathematics* 35 (1977): 239–255.
15. Kavrayskiy, V. V. *Izbrannye trudy.T.I: Astronomiya i geodeziya* M: Izd. UNGS VMF, 1956: 358.
16. Rodionov, A. I. and A. E. Sazonov. *Avtomatizatsiya sudovozhdeniya*. M: Transport, 1992: 192.
17. Efimov, I. V. and V. V. Kas'yanov. "K voprosu ob avtomatizatsii opredeleniya mesta sudna i otsenki ego tochnosti." *Morskoy Vestnik* 3(55) (2015): 67–71.
18. Loginovskiy, V. A. "Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.
19. Loginovskiy, V. A. "Assessing the accuracy of ship position through real-time measurements." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Васьков Анатолий Семёнович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Государственный морской  
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова  
353922, Российская Федерация, г. Новороссийск,  
пр. Ленина, 93  
e-mail: [as.vaskov@mail.ru](mailto:as.vaskov@mail.ru)  
**Мироненко Александр Анатольевич** —  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [alex\\_mironenko@mail.ru](mailto:alex_mironenko@mail.ru), [kaf\\_nav@gumrf.ru](mailto:kaf_nav@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vas'kov, Anatoliy S.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Ushakov State  
Maritime University  
93 Lenin Av., Novorossisk,  
353918, Russian Federation  
e-mail: [as.vaskov@mail.ru](mailto:as.vaskov@mail.ru)  
**Mironenko, Aleksandr A.** —  
Dr. of Technical Sciences, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [alex\\_mironenko@mail.ru](mailto:alex_mironenko@mail.ru), [kaf\\_nav@gumrf.ru](mailto:kaf_nav@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 мая 2025 г.  
Received: May 15, 2025.

## DEPTH-AIDED PREDICTION OF A VESSEL'S LONGITUDE USING A NEURAL NETWORK

**V. V. Deryabin**

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

*A depth-based method for determining vessel longitude using a neural network is proposed. The input of the network is a vector containing depth values measured at a certain spatial interval using an echo sounder. The output of the network is the longitude corresponding to the position of the last sounding. The network has several hidden layers, varying from one to ten layers. The hidden neurons use hyperbolic tangent activation functions, while the single neuron of the output layer employs a linear activation function. Algorithms for training data generation, network training, and testing are defined. Together, they form the basis for creating a neural network-based system for vessel longitude prediction, implemented in the Python programming language. The TensorFlow library is used for working with neural networks. An official electronic navigational chart is chosen as the source of bathymetric data. Based on the extracted sounding layer, a regular grid is formed, where depth values at the grid nodes are calculated using linear interpolation. The procedure for forming training and test data includes pseudorandom variations of sea level, which may result from both real fluctuations and measurement errors. For the test set, the accuracy of the network is acceptable for navigation, and the results depend on the number of hidden layers. The best accuracy, in terms of minimal maximum absolute longitude prediction error, is achieved with the network having the greatest number of hidden layers. It is also noted that it is necessary to test the developed neural network-based system using vessel motion modelling.*

*Keywords: vessel, longitude, depth, neural network, deep learning, autonomous mode, seabed relief, calculation algorithm, electronic chart, navigation.*

**For citation:**

Deryabin, Victor V. "Depth-aided prediction of a vessel's longitude using a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 481–492. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-481-492.

**УДК 656.61:004.032.26**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ МЕСТА СУДНА ПО ГЛУБИНАМ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**В. В. Дерябин**

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

*Предложен метод определения долготы места судна по рельефу дна с использованием нейронной сети, в качестве входного сигнала которой выступает вектор, содержащий значения глубины, измеренные с определенным пространственным шагом при помощи эхолота. Выходом сети служит значение долготы, соответствующее месту последнего измерения глубины. Сеть имеет несколько скрытых слоев, количество которых варьируется от одного до десяти. Скрытые нейроны обладают функциями активации в виде гиперболического тангенса. Единственный нейрон выходного слоя имеет линейную функцию активации. Определены алгоритмы формирования набора учебных данных, настройки и тестирования нейронной сети, формирующие технологию создания нейросетевой системы прогноза долготы места судна по глубинам и реализованные на языке программирования Python. Для работы с нейронными сетями используется библиотека TensorFlow. В качестве источника данных о глубинах выбирается официальная электронная навигационная карта. На основе извлеченного из нее слоя глубин формируется регулярная сетка, значения в узлах которой определяются линейной интерполяцией. Процедура формирования набора учебных и тестовых данных предполагает псевдослучайные изменения уровня моря, которые могут быть вызваны как реальными колебаниями, так и погрешностями измерений. На тестовой выборке сеть пока-*

зывает приемлемую для навигации точность, причем результаты зависят от количества скрытых слоев. Лучшая точность в виде наибольшего значения модуля ошибки прогноза долготы достигается для сети с наибольшим количеством скрытых слоев. Отмечается также необходимость тестирования разработанной нейросетевой системы на основе моделирования движения судна.

*Ключевые слова:* судно, долгота, глубина, нейронная сеть, глубокое обучение, автономный режим, рельеф дна, алгоритм расчета, электронная карта, навигация.

**Для цитирования:**

Дерябин В. В. Определение долготы места судна по глубинам на основе нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 481–492. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-481-492. — EDN CJWYZX.

### **Введение (Introduction)**

Для решения задач навигации морских судов необходимо знание точных координат их местоположения. В настоящее время координаты и скорость движения подвижных объектов определяются с высокой точностью при помощи глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В соответствии с конвенцией СОЛАС на каждом судне независимо от вместимости должен быть установлен приемник ГНСС или радионавигационной системы наземного базирования. Как известно, ГНСС имеют недостаток, который заключается в их неавтономности, т. е. зависимости от внешней информации, которая может быть подвержена воздействиям как непреднамеренного, так и целенаправленного характера. Данный недостаток ГНСС заставляет задуматься над поиском альтернативных решений. На судах торгового флота в качестве альтернативы ГНСС выступают радиолокационные и визуальные методы определения места в прибрежном плавании, а также астронавигационные — в открытом море. Методы определения местоположения по береговым ориентирам зависят, в частности, от состояния видимости. То же относится и к астрономическим методам. В отношении последних ситуация усугубляется тем, что секстан как навигационный инструмент не входит в перечень обязательного оборудования в соответствии с СОЛАС, несмотря на то, что требования государства флага судна иногда предусматривают его наличие.

В качестве альтернативы радионавигационным методам, а также для их контроля могут выступать методы навигации по глубинам, которые используют эталонные данные о рельефе дна, полученные на основе заранее проведенных промеров. Эталонные данные о подводном рельефе содержатся, например, в электронных навигационных картах (ЭНК), которые признаются СОЛАС в качестве официального источника информации при их использовании в электронных картографических навигационных информационных системах (ЭКНИС). В качестве инструмента измерений в режиме навигации может выступать однолучевой эхолот, который является обязательным для всех судов валовой вместимостью 300 и более. Таким образом, навигация судна по глубинам может быть организована в рамках стандартного укомплектования навигационным оборудованием многих морских судов. Подобного рода решения рассматриваются, например, в монографии [1]. Вопросам корреляционно-экстремальной навигации посвящены работы [2] и [3].

Использование поля рельефа для навигации подвижных объектов известно давно. Так, например, в [4] был опубликован алгоритм, который получил название TERCOM (Terrain Contour Matching). Его идея заключается в сравнении измеренной вдоль определенного направления текущей последовательности высоты рельефа с эталонными данными, в результате чего определяется наиболее близкое совпадение и становится возможным определение координат, так как все эталонные последовательности имеют привязку к местности. В принципе, идея данного метода уже используется в патенте [5]. На основе предварительных промеров создаются профили глубин, каждый из которых соответствует определенному направлению движения в районе плавания. Измеряется текущий профиль, и на основе данных счисления при помощи механической линейки с транспортиром выполняется поиск наиболее близкого эталонного профиля, с которым соотносятся координаты судна. Такого рода TERCOM-подобные методы относятся к классу *поисковых*. Работают они обычно совместно с системой счисления, которая позволяет не только



сократить область поиска до границ области неопределенности координат, но также и обеспечить измерение глубины в заданные моменты времени в заданном направлении движения.

Существенным ограничением поисковых методов навигации по эталонным данным является то, что при большой области поиска могут возникнуть проблемы с обеспечением быстродействия вычислений в режиме реального времени. Действительно, площадь области неопределенности счисления постоянно увеличивается, и процесс поиска занимает все большее время до тех пор, пока не будет получено надежное местоположение, выбранное в качестве новой начальной точки для счисления. Проблемы с обеспечением быстродействия заставляют задуматься над поиском новых решений, которые могут быть менее чувствительны к ограничениям по мощности вычислительных ресурсов. В качестве подобных решений целесообразно использовать искусственные *нейронные сети*, так как, во-первых, они позволяют организовать быстрые вычисления на специальных нейропроцессорах и, во-вторых, они известны в качестве инструментов универсальной аппроксимации функций многих переменных, а такая постановка задачи, в принципе, и наблюдается в рамках TERCOM-подхода. Таким образом, основная идея заключается в том, что сеть заранее обучается на большом объеме эталонных данных о глубинах на заданной акватории, в результате чего в ее коэффициентах содержится информация о соотношении глубин и координат. В режиме навигации на вход сети подается последовательность глубин, а на выходе получаются координаты. Иными словами, вместо полной эталонной базы данных о рельефе используется набор весов и пороговых значений сети, который значительно меньше по объему и главное не предполагает поиск в реальном времени.

Указанные идеи использования нейронных сетей были реализованы в исследованиях [6]–[8] (рассмотрены одномерный и двумерный случаи). В [9] предлагается отдельный подход к прогнозированию координат и рассмотрена сеть, прогнозирующая широту места судна по глубинам. В настоящей статье рассматривается прогнозирование долготы судна нейросетью на основе данных о глубинах.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Постановка задачи.* Будем считать, что с использованием однолучевого эхолота вдоль некоторого направления  $K$  измеряются с пространственным шагом  $\Delta s$  значения глубины  $d$ , которые образуют последовательность  $d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}$ , в которой  $p$  представляет собой количество значений глубин, используемых для прогноза долготы судна  $\lambda$ . Величина  $k$  может принимать значения от 0 до  $n - p + 1$ , где  $n + 1$  — общее количество значений глубин в наборе эталонных данных. Соответствующая последовательность значений долготы имеет вид:  $\lambda_k, \lambda_{k+1}, \lambda_{k+2}, \dots, \lambda_{k+p-1}$ . Необходимо на основе нейронной сети выполнить преобразование  $f$  следующим образом:

$$\lambda_{k+p-1} = f(d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}). \quad (1)$$

Иными словами, возникает задача регрессии или приближения функции нескольких переменных  $f(\cdot)$ , с которой нейронные сети, как известно (см., например, [10] и [11]), успешно справляются при условии корректного выбора их архитектуры, алгоритмов формирования набора учебных данных, обучения и тестирования.

Следует отметить, что похожая постановка задачи приводится в исследовании [9]. Отличие заключается в том, что в соотношении (1) в качестве зависимой переменной вместо долготы используется широта судна.

*Архитектура нейронной сети.* Среди большого разнообразия возможных вариантов архитектур нейронных сетей будем использовать сети прямого распространения, которые содержат несколько скрытых слоев. При этом под скрытым слоем будем понимать слой, который не имеет соединения с выходными сигналами. Первый скрытый слой принимает данные от слоя входных сигналов. Также будем считать, что сигнальные связи между слоями полные, т. е. любой нейрон текущего слоя соединяется с каждым нейроном последующего слоя. Причем направление движения сигнала возможно только от входа к выходу (прямое распространение сигнала). В соответствии

с требованиями универсальной аппроксимации нейроны скрытых слоев обладают нелинейными функциями активации (в данном конкретном случае в виде гиперболического тангенса), а нейрон выходного слоя — тождественной функцией, т. е. он оставляет взвешенную сумму поступающих на его вход сигналов без изменений.

*Формирование образцов.* Набор учебных данных включает образцы, т. е. пары «вход-выход», определенные в соответствии с соотношением (1). В качестве входного сигнала сети выступает последовательность глубин  $d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}$ , а в качестве выходного  $\lambda_{k+p-1}$  — значение долготы на момент измерения последней глубины  $d_{k+p-1}$ . В соответствии с постановкой задачи измерения глубины в режиме навигации должны выполняться в узлах регулярной сетки, поэтому образцы также должны соответствовать измерениям на регулярной сетке. Вопрос ее формирования рассмотрим более подробно.

В качестве источника информации о глубинах используется электронная навигационная карта US4SC31M, точнее, ее слой глубин SOUNDG. Район плавания, для которого создается система навигации по глубинам, ограничен параллелью с широтой  $32^\circ 52,5' N$  с Юга, меридианом с долготой  $079^\circ 05,8' W$  с Запада, параллелью с широтой  $33^\circ 12,6' N$  с Севера, меридианом с долготой  $078^\circ 41,9' W$  с Востока. Размеры акватории составляют приблизительно  $20 \times 20$  миль. Далее в пределах указанного района плавания формируется регулярная сетка меридианов и параллелей с фиксированным шагом по широте и долготе. Предполагая, что рекомендуемое направление движения  $K = 0$ , т. е. с юга на север и количество глубин для прогноза долготы равно  $p$ , сформируем эталонную матрицу глубин  $D$ :

$$D = \begin{pmatrix} d_0 & d_1 & \dots & d_{p-1} \\ d_1 & d_2 & \dots & d_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n-p+1} & d_{n-p+2} & \dots & d_n \end{pmatrix}.$$

Каждая строка матрицы  $D$  соответствует конкретному значению входного сигнала нейронной сети. Поскольку глубины на карте представлены, как правило, не в точности в узловых точках формируемой сетки, используются методы интерполяции (часто линейной) для определения необходимых значений.

Аналогичная матрица может быть составлена и для долготы:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_0 & \lambda_1 & \dots & \lambda_{p-1} \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n-p+1} & \lambda_{n-p+2} & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

Значению выходного сигнала соответствует последний элемент каждой строки матрицы  $\Lambda$ , номер которой равен индексу соответствующей строки матрицы  $D$ . Задача определения координат на основе TERCOM сводится к поиску в матрице  $D$  такой строки, которая будет наиболее близка к последовательности глубин, полученных в результате текущих измерений. В качестве степени близости может быть выбран, например, средний или максимальный модуль разности между текущей строкой и эталонной. При этом предполагается, что критерий близости вычисляется для тех строк матрицы  $D$ , которые соответствуют области неопределенности координаты, что может быть определено уже на основе эталонной матрицы  $\Lambda$ . В ней нужно найти такие строки, все элементы которых (значения долготы) принадлежат области неопределенности системы счисления пути судна. Далее необходимо рассматривать только те строки матрицы  $D$ , которые соответствуют оставшимся строкам  $\Lambda$ . Следует отметить, что процедура поиска строк  $\Lambda$ , находящихся в области неопределенности, также требует вычислительных ресурсов и имеет смысл, только если она выполняется быстрее, чем полный поиск с использованием всех строк эталонных матриц.



В рамках нейросетевого подхода на основе эталонных матриц  $D$ ,  $\Lambda$  формируются образцы, представляющие собой пары «вход-выход». В задачах машинного обучения часто приходится иметь дело с выборками трех типов: обучающей, контрольной и тестовой. *Обучающая выборка* содержит эталонные данные, которые непосредственно используются для настройки нейронной сети, т. е. на основе которых решается задача оптимизации свободных параметров (весовых коэффициентов и пороговых значений). *Контрольная выборка* используется для контроля обобщающих свойств сети, чтобы не допустить ее переобучения, когда сеть начинает просто запоминать конкретный набор данных, теряя при этом способность к обобщению, что выражается в потере робастности на этапе тестирования. Качество работы нейронной сети для образцов как контрольной, так и обучающей выборок характеризуется определенным критерием, в качестве которого часто используется средний квадрат ошибки. Выбор данного критерия для обучающей выборки удобен тем, что для него легко вычисляются производные, что актуально для алгоритма обратного распространения ошибки. Для контрольной выборки критерий может быть задан произвольно исходя из специфики решаемой задачи. В данном случае используется наибольшее значение модуля ошибки прогноза долготы. Несколько обособленно находится *тестовая выборка*. Она не используется непосредственно в процессе обучения, но позволяет судить о степени работоспособности нейронной сети после завершения обучения. Критерии качества работы могут быть различными. В данном случае используются наибольшее и среднее значения модуля ошибки прогноза долготы.

При формировании выборок возникают вопросы, связанные с количеством и качеством составляющих их образцов. Обучающая выборка должна быть репрезентативной, т. е. содержать достаточное количество образцов, характеризующих работу сети в определенной области пространства входного сигнала. При этом слишком большое количество образцов, среди которых много похожих друг на друга, «повторяющихся», будет затруднять процесс обучения, увеличивая время настройки сети. Указанное справедливо также и для контрольной выборки, но при этом хотелось бы, чтобы ее образцы находились как бы между образцами обучающей выборки, не совпадали с ними, но имели заметные отличия от них. Требования к формированию тестовой выборки совпадают с требованиями для контрольной с тем отличием, что для тестовой количество образцов должно быть таким, чтобы охватить как можно больше возможных значений входного сигнала сети. Для контрольной выборки слишком большое количество данных может существенно замедлить процесс настройки нейронной сети, поскольку они используются непосредственно для расчета показателя точности на итерациях обучения, т. е. многократно.

Рассмотрим процесс формирования выборок трех перечисленных типов более подробно. Основу обучающей выборки образуют эталонные матрицы  $D$ ,  $\Lambda$ . При этом матрица  $D$  подвергается псевдослучайным вариациям: к каждому ее элементу прибавляется псевдослучайная величина  $\delta$ , которая представляет собой изменение уровня моря на акватории, в пределах которой осуществляется навигация по рельефу дна. Существование величины  $\delta$  объясняется приливо-отливными явлениями, сгонно-нагонными процессами ветровой природы, а также систематическими ошибками эхолота. Конкретное значение суммы  $D + \delta$  может рассматриваться как некий псевдослучайный вариант (реализация) матрицы  $D$ . При этом эталонная матрица долготы  $\Lambda$  таким вариациям не подвергается, т. е. ее элементы остаются неизменными. Получается, что одной и той же координате соответствует уже не одна строка из матрицы  $D$ , а  $r_1 + 1$  строк, где  $r_1$  — количество псевдослучайных вариаций матрицы  $D$ . Таким образом, обучающая выборка формируется на основе  $r_1 + 1$  пар  $\{D + \delta, \Lambda\}$ , для одной из которых  $\delta = 0$ . Подобные вариации направлены не только на увеличение количества образцов, но и на повышение уровня робастности нейронной сети, которая должна обеспечиваться в реальных условиях эксплуатации, предполагающих, что в точности строки из матрицы  $D$  в общем случае не будут подаваться на вход сети и придется иметь дело с их искаженными версиями. Аналогичным образом формируются образцы для контрольной и тестовой выборок с тем лишь отличием, что сама матрица  $D$  не используется, а используются только ее псевдослучайные реализации. Количество таких реализаций для контрольной

выборки обозначим через  $r_2$ , а для тестовой — через  $r_3$ . Таким образом, если, например,  $r_1 = r_2 = r_3$ , то при прочих равных условиях образцов в обучающей выборке должно быть больше, чем в контрольной и тестовой.

При формировании набора учебных данных следует учитывать также следующее обстоятельство. Может так получиться, что значение какого-либо элемента видоизмененной матрицы  $D$ , т. е.  $D + \delta$  примет значение, которое не имеет смысла использовать для целей навигации по глубинам. Например, одна из глубин составляет 2 м, но с учетом  $-3 \text{ м} \leq \delta \leq 3 \text{ м}$  ее значение после изменения может составлять, например,  $-0,5 \text{ м}$  (при  $\delta = -2,5 \text{ м}$ ). Понятно, что «отрицательная» глубина не может использоваться. В связи с ранее изложенным целесообразно также ввести в рассмотрение минимальное допустимое значение глубины  $d_{\min}$ , которое можно использовать в навигационных целях. Указанное значение может быть определено, например, на основе минимально допустимого значения глубины под килем для судов, которые планируют использовать систему навигации по глубинам. Если хотя бы один элемент какой-либо строки  $D + \delta$  окажется менее  $d_{\min}$ , то соответствующий ей образец не формируется и не включается в выборку. Следует отметить, что использование  $d_{\min}$  в качестве дополнительного параметра алгоритма формирования образцов актуально в районах с малыми глубинами. Например, в рассматриваемом случае для карты US4SC31M в пределах района навигации наименьшее значение глубины составляет 6,7 м при максимальном значении, равном 32,8 м.

После получения набора учебных данных образцы часто подвергают процедуре масштабирования. Смысл ее заключается в том, что задаются границы интервала масштабирования  $[\min, \max]$ , в которые приводятся значения исходной величины, где наибольшему значению соответствует  $\max$ , а наименьшему —  $\min$ . Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией (точная формула содержится, например, в [9]). В итоге алгоритм обучения использует уже масштабированный вариант обучающей выборки. Следует отметить, что на этапе тестирования и использования нейросетевой системы к ее выходу необходимо выполнять обратное по отношению к указанному масштабированию преобразование. При этом входные образцы масштабируются так же, как это выполняется на этапе формирования образцов.

Процедура масштабирования помимо величин  $\min$ ,  $\max$  также предполагает использование наименьшего и наибольшего значений глубины, которые могут наблюдаться для рассматриваемого района плавания. Наименьшее значение глубины (для масштабирования) выбирается равным или  $d_{\min}$  или минимальному значению глубины минус величина  $A_\delta$  (наибольший возможный модуль изменения уровня моря  $\delta$ ). Последний вариант выбирается, когда разность более  $d_{\min}$ , в противном случае выбирается  $d_{\min}$ . Наибольшее значение глубины (для масштабирования) всегда выбирается как максимальное значение глубины плюс величина  $A_\delta$ . Если в режиме навигации наблюдается выход текущего значения глубины за пределы масштабирования, то необходимо брать сами пределы в качестве текущих значений. Выход за правую границу может наблюдаться, если текущий уровень моря отличается (в большую сторону) от эталонного более чем на  $A_\delta$ . Выход за левую границу предельных значений происходит по аналогичным причинам с той особенностью, что предельно низкий уровень должен быть ограничен  $d_{\min}$  даже в том случае, когда не  $d_{\min}$  принято в качестве левой границы.

Матрица  $D$  сформирована для направления движения с юга на север. Очевидно, что ее можно использовать и для обратного направления, т. е. с севера на юг. Для этого достаточно просто поменять порядок следования элементов строк на обратный в матрицах  $D$ ,  $\Lambda$  и далее следовать тому же алгоритму формирования образцов, что и для исходного направления. Понятно также и то, что матрицу  $D$  можно использовать и для рекомендуемых направлений с запада на восток и обратно. Для реализации указанного необходимо использовать, в частности, операцию транспонирования матрицы. Для промежуточных направлений вопрос использования матрицы  $D$  подлежит дополнительному исследованию. Дело, в частности, заключается в том, что в случае главных румбов движение происходит вдоль либо меридианов, либо параллелей, а для промежуточного направления — вдоль локсодромий. При том же самом пространственном

разрешении координаты узловых точек меняются. Их определение требует дополнительных вычислений на основе информации, не содержащейся непосредственно в матрице  $D$ .

Таким образом, параметрами алгоритма формирования набора учебных (и тестовых) данных являются:

- рекомендуемое направление движения  $K$ ;
- шаг по широте и долготе;
- количество значений глубин  $p$ , используемых для прогноза долготы;
- предельная ошибка уровня моря  $A_\delta$  ( $-A_\delta \leq \delta \leq A_\delta$ );
- количество псевдослучайных вариаций  $r_1, r_2$  (и  $r_3$  для тестовой выборки);
- наименьшее допустимое значение глубины  $d_{\min}$ ;
- границы интервала масштабирования образцов  $\min, \max$ .

*Обучение нейронной сети.* Для обучения (настройки) нейронной сети будем применять алгоритм Adamax [12], относящийся к классу градиентных методов оптимизации первого порядка. Один шаг данного алгоритма применяется на каждой итерации цикла, на которой отслеживается показатель точности в виде наибольшего значения модуля ошибки прогноза долготы, рассчитанного для образцов из контрольной выборки. Наиболее оптимальное состояние сети сохраняется в соответствии именно с данным критерием. При этом оптимизационная процедура выполняется для традиционного среднего квадрата ошибки, вычисленного для образцов из обучающей выборки. Сам по себе алгоритм Adamax имеет несколько параметров, которые могут быть изменены. Их описание содержится, например, в документации TensorFlow вер. 2.16.1. Также в рамках библиотеки TensorFlow предусмотрена возможность использования алгоритма регуляризации в целях предотвращения переобучения нейронной сети.

Как известно, процедура регуляризации не позволяет отдельным весовым коэффициентам принимать слишком большие значения, что может являться косвенным признаком переобучения. Для этого переходят к целевой функции, которая содержит не просто средний квадрат ошибки, а также слагаемое, которое учитывает значения весовых коэффициентов сети, подлежащих настройке. Учет величин коэффициентов может быть реализован, например, в виде суммы их модулей или суммы их квадратов. Возможны также и комбинации данных вариантов.

Обучение нейронных сетей происходит в общем случае в мини-пакетном режиме. Когда в мини-пакете всего один образец, то речь идет о последовательном режиме обучения (коррекция весов выполняется после рассмотрения каждого образца из обучающей выборки). Когда в мини-пакете содержатся все образцы из обучающей выборки, сеть обучается в пакетном режиме (коррекция весов выполняется после рассмотрения сразу всех образцов из обучающей выборки). Таким образом, последовательный режим обучения и пакетный режим являются частными случаями мини-пакетного режима. В любом случае размер мини-пакета также является параметром процедуры обучения нейросети.

Еще один параметр процедуры настройки связан с остановкой процесса обучения нейросети. Часто в роли данного критерия выбирается максимальное количество итераций (эпох), по прошествии которого алгоритм обучения завершается. В качестве альтернативы может быть выбрано также наибольшее время работы алгоритма, что предполагает зависимость от вычислительных возможностей компьютера, на котором выполняется обучение. Не исключен случай, когда процесс останавливается по достижении нейронной сетью необходимой точности.

*Проверка работоспособности нейронной сети.* Для проверки работоспособности нейросети используется тестовая выборка, которая формируется точно по такому же принципу, что и контрольная с использованием  $r_3$  псевдослучайных вариаций эталонной матрицы глубин  $D$ . Следует отметить, что с понятием работоспособности связано понятие робастности, т. е. устойчивости нейронной сети к изменениям входных данных по отношению к тем, которые наблюдались на этапе обучения. Критерием робастности при этом служит обычно та же величина, что использовалась для расчета точности на этапе обучения для образцов из контрольной выборки. Следует также отметить, что предлагаемый метод тестирования учитывает только колебания уровня моря (реальные

или из-за ошибок измерений), в чем и заключается его ограничение, так как в действительности искажения входного сигнала могут наблюдаться также ввиду ограниченной точности счисления на этапе использования нейронной сети (в режиме навигации).

### Результаты (Results)

Рассмотренные ранее основные этапы создания нейросетевой системы навигации по глубинам были выполнены с использованием языка программирования Python. В качестве библиотеки обучения нейронных сетей выбрана TensorFlow вер. 2.16.1 (Keras). Нейронная сеть имеет один скрытый слой, содержащий 200 нейронов с функцией активации в виде гиперболического тангенса.

Параметры алгоритма формирования набора учебных и тестовых данных принимают следующие значения:

- рекомендуемое направление движения  $K = 0$ ;
- шаг по широте и долготе — 0,5 мили;
- количество значений глубин, используемых для прогноза долготы:  $p = 20 + 1$ ;
- предельная ошибка уровня моря  $A_{\delta} = 1$  м;
- количество псевдослучайных вариаций  $r_1 = r_2 = 100$ ,  $r_3 = 1000$ ;
- наименьшее допустимое значение глубины  $d_{\min} = 1$  м;
- границы интервала масштабирования образцов  $\min = -1$ ,  $\max = +1$ .

Процесс обучения был запущен с максимальным количеством итераций, равным 5000. Каждый мини-пакет содержит 100 образцов. По прошествии всех 5000 эпох наименьшее значение максимального модуля ошибки прогноза долготы (для контрольной выборки) было зафиксировано на 4805-й итерации и составило  $0,032218^\circ$ . Для данного района плавания такая ошибка соответствует примерно 3015 м на эллипсоиде WGS-84. Кривая обучения изображена на рисунке.

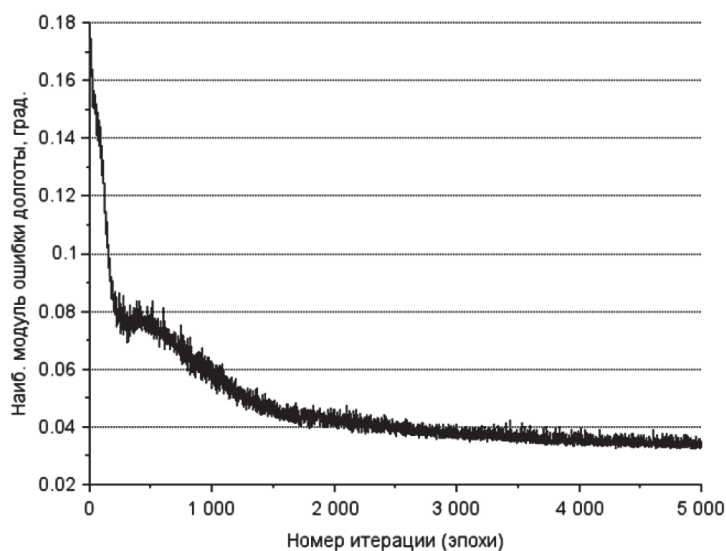


График процесса обучения  
(контрольная выборка, один скрытый слой)

Вычислив наибольший и средний модули ошибки обученной нейронной сети для тестовой выборки, получим следующие значения:  $0,03424^\circ$  и  $0,004154^\circ$ . Для рассматриваемого района плавания указанные показатели соответствуют примерно 3204 и 389 м, что вряд ли можно считать хорошим результатом с точки зрения навигационного использования.

Рассмотрим другие варианты архитектуры нейронной сети, отличающиеся от рассмотренной количеством скрытых слоев (глубокие архитектуры). Результаты сведем в следующую таблицу.



### Результаты обучения и тестирования нейронной сети

| Количество скрытых слоев | Обучение                             |                                       | Тестирование                |                            |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                          | Наименьший максимум модуля ошибки, ° | Номер итерации минимального максимума | Наибольший модуль ошибки, ° | Средний модуль ошибки, °   |
| 1                        | 0,032218                             | 4805                                  | 0,03424                     | 0,004154                   |
| 2                        | 0,001975                             | 4721                                  | 0,002451                    | 0,000248                   |
| 3                        | 0,000852                             | 3240                                  | 0,002978                    | 0,000226                   |
| 4                        | 0,000761                             | 1087                                  | 0,003115                    | <b>9,9·10<sup>-5</sup></b> |
| 5                        | 0,000651                             | 4928                                  | 0,002643                    | 0,000127                   |
| 10                       | 2,1·10 <sup>-5</sup>                 | 3441                                  | <b>0,000495</b>             | 0,00015                    |

В столбце «Обучение» приведено наименьшее значение максимума модуля ошибки прогноза долготы (для контрольной выборки) и номер той эпохи, для которой это наименьшее значение достигается. В столбце «Тестирование» приводятся характеристики точности сетей, которые они обнаруживают на этапе тестирования, т. е. рассчитанные для образцов тестовой выборки. Лучшие результаты тестирования выделены жирным шрифтом.

### Обсуждение (Discussion)

Как следует из данных таблицы, лучший результат (в смысле максимума модуля ошибки прогноза долготы) был получен для нейронной сети, содержащей 10 скрытых слоев. Указанный критерий составил 0,000495°, что соответствует примерно 46,3 м на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84. При этом средняя точность составляет 14 м. В принципе, такую точность можно считать вполне приемлемой для навигационных целей. Увеличение числа скрытых слоев в целом позволило увеличить точность прогноза долготы нейронной сетью. Интересно также отметить, что наилучшее значение среднего модуля ошибки на тестовой выборке зафиксировано для сети, имеющей четыре скрытых слоя, а не той, которая оптимальна в смысле наибольшего модуля ошибки прогноза.

Если рассматривать критерий точности, рассчитанный для образцов из контрольной выборки (см. таблицу), то наблюдается его уменьшение по мере увеличения количества скрытых слоев нейронной сети, т. е. точность тем лучше, чем больше количество скрытых слоев сети, т. е. чем сеть глубже. Для критериев точности, рассчитанных для тестовой выборки, такое правило строго не соблюдается, хотя определенная тенденция на увеличение точности в связи с увеличением количества скрытых слоев наблюдается. Отдельного внимания заслуживает мелкая нейронная сеть (с одним скрытым слоем), все характеристики точности которой принимают наибольшие (наихудшие) значения. Таким образом, если сеть с большим количеством слоев прогнозирует более точно долготу для образцов контрольной выборки, то это не обязательно означает, что сеть с меньшим количеством слоев будет менее точной для образцов из тестовой выборки. Возможно, при большем количестве тестовых данных соотношение архитектур сетей и критериев точности будет несколько иным, но для текущих тестовых выборок результаты получились такими.

Номер итерации, на которой был зафиксирован наилучший показатель точности для контрольной выборки, для сетей с одним, двумя, тремя и четырьмя скрытыми слоями закономерно уменьшается по мере увеличения количества скрытых слоев. Так, например, для однослойной сети лучший результат был зафиксирован на 4805-й итерации, а для четырехслойной — на 1087-й. Действительно, чем больше свободных параметров имеет сеть, тем переобучение, казалось бы, должно, как правило, начинаться раньше, так как размер обучающей выборки остается неизменным. Однако неожиданный результат был получен по мере увеличения количества скрытых слоев сначала до пяти, а затем и до десяти. Номер оптимальной итерации увеличился (для пяти слоев), а затем вновь уменьшился (для десяти слоев), но оказался существенно большим, чем для сети с четырьмя скрытыми слоями. Возможно, данный факт можно объяснить тем,



что на переобучение влияет не только соотношение между свободными параметрами сети и объемом обучающей выборки, но также и алгоритм инициализации весовых коэффициентов сети, который, в свою очередь, влияет на сходимость алгоритма обучения и содержит определенный элемент случайности.

Следует обратить также внимание на график процесса обучения, приведенный на с. 488. В своей общей тенденции кривая обучения описывает убывающую функцию. Однако скорость такого убывания различна на разных участках. Можно выделить по меньшей мере три участка, отличающихся скоростью убывания критерия точности. Первый участок (приблизительно от 0 до 300 итераций) характеризуется стремительным падением наибольшего модуля ошибки прогноза долготы. На втором участке (приблизительно от 500 до 1800) уменьшение указанного критерия уже не такое быстрое, как на первом. На третьем участке (приблизительно от 2000 и до конца обучения) наблюдается самая слабая тенденция к уменьшению целевого показателя. Кривая обучения здесь как бы асимптотически приближается к некоторому минимально возможному значению, что косвенно может указывать на то, что существенно увеличить точность за счет дальнейшего увеличения максимального количества итераций быстро вряд ли получится. Другой особенностью кривой обучения является ее шумовой характер. Конечно, такие шумовые колебания не слишком существенны на фоне общей тенденции критерия к уменьшению, но тем не менее они наблюдаемы, что подтверждает правильность применяемого подхода к обучению, когда интересующий целевой критерий определяется на каждой итерации, и лучшее состояние сети в соответствии с ним сохраняется в качестве наиболее оптимального. Шумовой характер сам по себе в рассматриваемом случае не позволяет однозначно судить о наличии неустойчивости процесса обучения, поскольку алгоритм обучения минимизирует средний квадрат ошибки, а не максимальный ее модуль.

Ответ на вопрос: *чем отличается обученная нейронная сеть от традиционного TERCOM-алгоритма*, может быть следующим. Оба алгоритма используют эталонные данные, TERCOM использует указанные данные непосредственно в режиме навигации. Каждый раз по мере поступления новых измерений выполняется поиск по базе эталонных данных (матрице  $D$ ). Нейронная сеть использует эталонные данные только на этапе обучения, которое может быть выполнено с использованием мощных компьютеров на берегу заранее. Далее вся информация хранится в наборе весовых коэффициентов сети, объем которого, как правило, намного меньше, чем объем учебных данных в виде эталонных матриц, и в режиме навигации он непосредственно не нужен, так как вся информация уже имеется в виде коэффициентов. Конечно, критическое значение для нейросетевого подхода имеет степень робастности сети, работающей с реальными выборками глубин.

### Заключение (Conclusion)

В ходе выполнения настоящего исследования были последовательно решены следующие задачи: выбрана архитектура нейронной сети, прогнозирующей долготу судна по глубинам; сформирован набор учебных данных для ее настройки; проведено обучение, а также определен способ тестирования уже обученной сети. Результаты тестирования показали, что нейронная сеть позволяет прогнозировать долготу места судна с хорошей точностью. Было рассмотрено несколько архитектур, отличающихся количеством скрытых слоев, что позволило выявить их влияние на точность, критерии которой определялись для образцов из тестовой выборки. В частности, лучший результат по критерию максимума модуля ошибки прогноза был получен для самой глубокой нейросетевой архитектуры, содержащей десять скрытых слоев. Использование такой сети в комбинации с сетью, прогнозирующей широту, представляет собой использование нейросетевого алгоритма определения координат места судна по глубинам. Тем не менее к полученным результатам тестирования необходимо относиться как к предварительным. Дело в том, что искажение входного сигнала, в качестве которого выступает последовательность глубин, измеренных эхолотом через равные отрезки пройденного судном расстояния, может быть вызвано не только колебаниями уровня моря. Искажение может происходить также по причине конечной точности

счисления, которое используется, во-первых, для обеспечения движения судна вдоль рекомендованного направления в области батиметрической навигации и, во-вторых, для определения приращений пройденного расстояния для выполнения промеров.

Поэтому важным развитием настоящего исследования является применение такого метода тестирования, который может учитывать ограничения точности счисления, характерные для конкретного судна в заданном районе плавания. Подобный метод может быть реализован на основе моделирования движения судна. Последнее, в свою очередь, может быть выполнено как с использованием уравнений динамики судна, так и с использованием только кинематических соотношений для описания его движения на поверхности Земли. Такой подход позволит, в принципе, предварительно оценить робастность сети в условиях, в определенной степени приближенных к реальной навигации. Конечно, окончательное тестирование должно проводиться в реальных условиях плавания. Другим важным направлением исследований является определение такой архитектуры нейронной сети, которая была бы оптимальной не только с точки зрения точности, но также и быстродействия, обеспечение которого тоже имеет значение, так как нейросетевой алгоритм предполагается к применению в режиме реального времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключева С. Ф. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации / С. Ф. Ключева, В. В. Завьялов. — Владивосток: Морской гос. ун-т, 2013. — 132 с.
2. Степанов О. А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах: Аналитический обзор / О. А. Степанов. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. — 84 с.
3. Ma D. A robust fusion terrain-aided navigation method with a single beam echo sounder / D. Ma, T. Ma, Y. Li, Y. Ling, Y. Ben // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 286. — Pp. 115610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115610.
4. Golden J. P. Terrain Contour Matching (TERCOM): a cruise missile guidance aid / J. P. Golden // *Image processing for missile guidance*. — 1980. — Vol. 238. — Pp. 10–18.
5. Патент 3212189, США. Marine navigation procedure / Savit C. H.; опуб. 19.10.1965.
6. Дерябин В. В. Нейросетевой метод определения места судна по рельефу дна / В. В. Дерябин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 723–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734. — EDN XZLJTC.
7. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16. — EDN LJVSHI.
8. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по рельефу дна при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179. — EDN ZCDZNR.
9. Дерябин В. В. Определение широты места судна по глубинам на основе нейронной сети / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 94–104. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-94-104. — EDN KCJFZV.
10. Wang M–X. Approximation capabilities of neural networks on unbounded domains / M–X. Wang, Y. Qu // *Neural Networks*. — 2022. — Vol. 145. — Pp. 56–67. DOI: 10.1016/j.neunet.2021.10.001.
11. Горбань А. Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А. Н. Горбань // *Сибирский журнал вычислительной математики*. — 1998. — Т. 1. — № 1. — С. 11–24. — EDN PRZOML.
12. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. Ba // *3rd International Conference on Learning Representations*. — 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

## REFERENCES

1. Klyueva, S. F. and V. V. Zav'yalov. *Sintez algoritmov batimetricheskikh sistem navigatsii* Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013: 132.

2. Stepanov, O. A. *Metody otsenki potentsial'noy tochnosti v korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh Analiticheskiy obzor* SPb: TsNII "Elektropribor", 1993: 84.
3. Ma, D., Y. Ben, et al. "A robust fusion terrain-aided navigation method with a single beam echo sounder." *Ocean Engineering* 286 (2023): 115610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115610.
4. Golden, J. P. "Terrain Contour Matching (TERCOM): a cruise missile guidance aid." *Image processing for missile guidance* 238 (1980): 10–18.
5. Savit, Carl H. Patent No. 3,212,189. Marine navigation procedure. U. S. Publ. 19 Oct. 1965.
6. Deryabin, Victor V. "Neural network-based method for determining vessel position by seabed relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 723–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734.
7. Deryabin, Victor V. "Depth-based vessel position fixing by means of a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.
8. Deryabin, Victor V. "Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.
9. Deryabin, Victor V., Sazonov Anatoly E. "Depth-aided prediction of vessel latitude based on a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 94–104. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-94-104.
10. Wang, M–X. and Y. Qu. "Approximation capabilities of neural networks on unbounded domains." *Neural Networks* 145 (2022): 56–67. DOI: 10.1016/j.neunet.2021.10.001.
11. Gorban', A. N. "Obobschennaya approksimatsionnaya teorema i vychislitel'nye vozmozhnosti neyronnykh setey." *Siberian Journal Of Numerical Mathematics* 1.1 (1998): 11–24.
12. Kingma, Diederik P., and Ba Jimmy. "Adam: A method for stochastic optimization." *3rd International Conference on Learning Representations*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Дерябин Виктор Владимирович** —  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Deryabin, Victor V.** —  
Dr. of Technical Sciences, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 06 июня 2025 г.  
Received: June 06, 2025.

## APPLICATION OF QUEUING THEORY IN THE ORGANIZATION OF BULK CARGO TRANSSHIPMENT AT A CONTAINER TERMINAL

**O. A. Izotov, N. S. Polubotko, E. E. Marushkina**

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

*The study evaluates the effectiveness of integrating specialized transshipment equipment for handling railway rolling stock in the rear area of the marine terminal and during the loading of bulk cargo into the technological chains for processing large-capacity containers. It is noted that the problem requires a comparative assessment of operational characteristics and preliminary calculations of the performance of loading and unloading machines at the cargo fronts where they are employed. The technological process for handling fertilizers in large-capacity containers is proposed to be considered as two subsystems differing in work rhythm: ensuring transfer of cargo between the railway and the accumulation warehouse, as well as delivery for loading by internal terminal transport. To develop proposals for the optimal use of the selected type of transshipment equipment at the work fronts, a comparative analysis of the terminal's "bottlenecks," identified in the presented mathematical model, can be performed. It is emphasized that the proposed technology for handling bulk cargo at a sea container terminal differs from the traditional scheme for handling large-capacity containers in that the container is used only at the stage of fertilizer delivery to the ship. After the container is emptied, it must be transported through the terminal warehouse to the packing point at the manufacturing plant. Since the two processing subsystems identified in the course of the study at the marine fertilizer terminal in bulk containers require the creation of a different number of service channels for cargo flows, this case provides a classic example of solving a problem of a multi-channel queuing system with waiting, in order to calculate the number of unloading, loading, and reloading positions at each identified work front. The paper concludes that the reliability of assessing the capabilities of the terminal's transshipment equipment will make it possible to organize a queuing system without waiting, i. e., with a given service intensity.*

*Keywords: queuing theory, transshipment equipment, marine terminal, bulk cargoes, transport systems, transshipment processes, cargo delivery and handling, large-capacity containers.*

**For citation:**

Izotov, Oleg A., N. S. Polubotko and E. E. Marushkina. "Application of queuing theory in the organization of bulk cargo transshipment at a container terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 493–501. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-493-501.

**УДК 656.073.7**

## ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВАЛКИ НАСЫПНЫХ ГРУЗОВ НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ

**О. А. Изотов, Н. С. Полуботко, Е. Е. Марушкина**

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

*Темой исследования является оценка эффективности включения в технологические цепочки обработки большегрузных контейнеров специализированного перегрузочного оборудования для обработки подвижного состава железнодорожного транспорта в тыловой зоне морского терминала и в ходе погрузки судна насыпными грузами. Отмечается, что постановка задачи требует сравнительной оценки эксплуатационных характеристик и предварительных расчетов производительности погрузочно-разгрузочных машин на грузовом фронте их использования. Технологический процесс по обработке удобренных в большегрузных контейнерах предложено рассматривать как две отличающиеся по ритму работ*



подсистемы, обеспечивающие передачу груза между железной дорогой и складом накопления и подачу груза на погрузку внутртерминальным транспортом. В целях выработки предложений по поиску оптимального применения на фронтах работ выбранного типа перегрузочного оборудования может быть произведен сравнительный анализ «узких мест» терминала, обозначенных в представленной математической модели. Подчеркивается, что приведенная технология обработки насыпных грузов на морском контейнерном терминале отличается от традиционной схемы обработки большегрузных контейнеров тем, что контейнер применяется на этапе доставки удобрений только до борта судна — после высыпания груза он подлежит транспортировке через склад терминала до пункта затарки на завод-производитель. Поскольку выделенные в ходе исследования две подсистемы обработки на морском терминале удобрений в насыпных контейнерах требуют создания разного количества каналов обслуживания грузопотоков, в данном случае имеет место классический пример решения задачи многоканальной системы массового обслуживания с ожиданием с целью расчета количества мест выгрузки, погрузки и перегрузки на каждом выявленном фронте работ. В работе сделан вывод о том, что достоверность оценки возможностей перегрузочного оборудования терминала позволит организовать систему массового обслуживания без ожидания обслуживания в очереди, т. е. с заданной интенсивностью.

*Ключевые слова:* теория массового обслуживания, перегрузочное оборудование, морской терминал, насыпные грузы, транспортные системы, перегрузочные процессы, доставка и обработка грузов, крупнотоннажные контейнеры.

#### **Для цитирования:**

Изотов О. А. Применение аппарата теории массового обслуживания при организации перевалки насыпных грузов на контейнерном терминале / О. А. Изотов, Н. С. Полуботко, Е. Е. Марушкина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 493–501. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-493-501. — EDN CLEZQY.

### **Введение (Introduction)**

Оценка эффективности включения в технологические цепочки перемещения большегрузных контейнеров того или иного перегрузочного оборудования при обработке железнодорожного подвижного состава и на морском терминале требует сравнительной оценки эксплуатационных характеристик и расчета производительности механизмов на грузовом фронте их применения. На основе выявленных показателей формируется логистический подход учета возможностей такого оборудования и процесс совершенствования погрузочно-разгрузочных работ, что становится наиболее востребованным при планировании обработки нетрадиционных для морского контейнерного терминала грузов [1].

Современные терминалы оснащены разнообразными видами перегрузочного оборудования, а именно: фронтальными перегружателями для обработки судов, козловыми кранами и погрузчиками для формирования складских зон, внутренним транспортом для подачи грузов на грузовые фронты перевалки и т. д. Все это оборудование включено в единые технологические процессы перемещения крупнотоннажных контейнеров как между видами транспорта, так и по штабелированию на складах [2].

Целью работы является обоснование потребного количества перегрузочного оборудования на грузовых фронтах терминала, позволяющих сформировать  $n$  каналов обслуживания в описанной системе массового обслуживания и выявить зависимости скорости обработки грузопотока от эксплуатационных характеристик рассматриваемых элементов инфраструктуры терминала.

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

При обработке на морском терминале удобрений в насыпных контейнерах рассматриваемый технологический процесс целесообразно разделить на две подсистемы:

- ежедневная обработка поступающих железнодорожным транспортом грузов (рис. 1);
- периодическая работа с грузопотоком по мере подачи под обработку морских судов (рис. 2).





Рис. 1. Схема обработки грузов на железнодорожном грузовом фронте

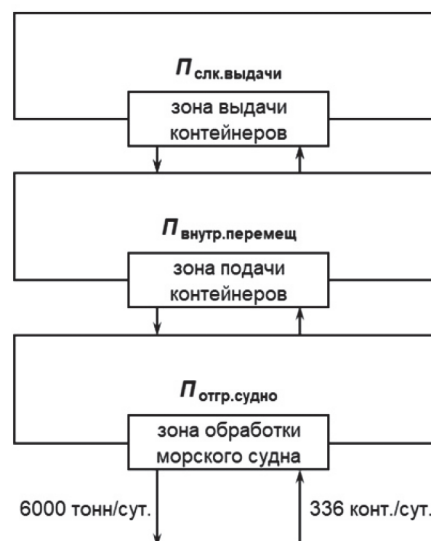


Рис. 2. Схема обработки грузов на морском грузовом фронте

При обработке грузов первая подсистема призвана построить схему расстановки механизмов, обеспечивающих соблюдение следующего условия:

$$П_{ж/д ст} \leq П_{ж/д гр. фронта} \leq П_{скл.отгр}.$$

Здесь  $П_{ж/д ст}$  — пропускная способность предпортовой железнодорожной станции обеспечить подачу подвижного состава с большегрузными контейнерами в тыловую зону терминала, зону железнодорожных платформ или конт./сут;  $П_{ж/д гр. фронта}$  — суммарная производительность оборудования обеспечивающего обработку поступающих контейнеров и подачу их на склад хранения, конт./сут;  $П_{скл.отгр}$  — суммарная производительность оборудования обеспечивающего отгрузку на железнодорожный транспорт порожних контейнеров, конт./сут.

В целях обеспечения бесперебойной обработки железнодорожного подвижного состава суммарная производительность оборудования терминала должна превышать или быть равной пропускной способности предпортовой железнодорожной станции.

При обработке грузопотоков вторая подсистема призвана построить схему расстановки механизмов, обеспечивающих соблюдение следующего условия:

$$П_{скл.выдачи} \geq П_{внутр.перемещ} \geq П_{отгр.судно}.$$

Здесь  $П_{скл.выдачи}$  — суммарная производительность оборудования, обеспечивающего выдачу большегрузных насыпных контейнеров с удобрениями внутреннему транспорту терминала, конт./сут;  $П_{внутр.перемещ}$  — суммарная провозная способность внутреннего транспорта терминала обеспечивающего подачу контейнеров на морской грузовой фронт, конт./сут;  $П_{отгр.судно}$  — суммарная производительность оборудования, обеспечивающего отгрузку удобрений из большегрузных насыпных контейнеров в морское судно, т или конт./сут.

В целях обеспечения бесперебойной обработки морского судна производительность оборудования, осуществляющего выдачу большегрузных насыпных контейнеров с удобрениями, и суммарная провозная способность внутреннего транспорта терминала должны превышать или быть равными суммарной производительности оборудования, осуществляющего отгрузку удобрений из большегрузных насыпных контейнеров в судно [3, 4].

Оптимизация применения того и иного типа перегрузочного оборудования на фронтах работ требует сравнительного анализа «узких мест» терминала, выявленных в представленной математической модели. Задачи в такой постановке могут решаться с применением аппарата теории массового обслуживания. Приведенный практический пример отличается от традиционной

схемы обработки большегрузных контейнеров на морском терминале тем, что контейнер применяется на этапе доставки удобрений только до борта судна и после высвобождения от груза подлежит обратной транспортировке через склад терминала железнодорожным транспортом до пункта затарки на завод-производитель.

Таким образом, с железнодорожной станции одновременно из поездной партии под выгрузку загруженных контейнеров и обратную отгрузку порожних контейнеров может быть подано  $n$  платформ, т. е. это является классической задачей *многоканальной системы массового обслуживания с ожиданием* [5]. Применение того или иного вида оборудования для обработки контейнеров будет являться частным (непринципиальным в постановке задачи) случаем, главное, что при этом задействован один из каналов обслуживания поданной в виде вагона заявки.

Количество одновременно подаваемых под обработку железнодорожных платформ на терминалах зависит от длины приемных путей, т. е. является *случайной величиной*. Обслуживание партий вагонов должно производиться в строго определенных временных параметрах, призванных задать ритмичность всего процесса [6, 7].

Неравномерную загрузку системы массового обслуживания при равномерной подаче вагонов может определять время цикла перегрузочного оборудования (ричстакера), от производительности которого будет зависеть также потребность в таких механизмах (табл. 1).

Таблица 1

**Зависимость потребности в перегрузочном оборудовании от времени цикла погрузчика как основного параметра системы массового обслуживания**

| <i>Динамика изменений эксплуатационных характеристик железнодорожной станции</i>         |                 |      |      |      |      |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|--|
| Объем подачи ж/д платформ в поезде                                                       | ж/д плат. / сут | 56   | 56   | 56   | 56   |  |
| Объем подачи контейнеров                                                                 | конт. / сут     | 112  | 112  | 112  | 112  |  |
| Количество вагонов в одной подаче                                                        | вагон / подача  | 8    | 8    | 8    | 8    |  |
| Количество подач вагонов                                                                 | подача / сут    | 7    | 7    | 7    | 7    |  |
| Время подачи-уборки одной партии вагонов                                                 | ч               | 3,4  | 3,4  | 3,4  | 3,4  |  |
| <i>Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожного грузового фронта терминала</i> |                 |      |      |      |      |  |
| Время цикла ричстакера по выгрузке и погрузке контейнера                                 | мин             | 16   | 18   | 20   | 22   |  |
| Производительность ричстакера в час                                                      | конт. / ч       | 3,8  | 3,3  | 3    | 2,7  |  |
| Производительность ричстакера в сутки (7 ч)                                              | конт. / сут     | 26,3 | 23,3 | 21,0 | 19,1 |  |
| Количество ричстакеров для обработки поезда                                              | ед.             | 4,3  | 4,8  | 5,3  | 5,9  |  |

Неравномерную загрузку системы массового обслуживания при равном времени цикла перегрузочного оборудования (ричстакера) могут задавать различные партии подаваемых под обработку вагонов, что приведет к сокращению количества подач вагонов на терминал и, как следствие, к сокращению времени их обработки<sup>1</sup> и росту потребности в перегрузочном оборудовании (табл. 2).

Таблица 2

**Зависимость потребности в перегрузочном оборудовании от партии одновременно подаваемых под обработку вагонов как основного параметра системы массового обслуживания**

| <i>Динамика изменений эксплуатационных характеристик железнодорожной станции</i> |                     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| Объем подачи ЖД платформ в поезде                                                | ж/д платформа / сут | 56  | 56  | 56  | 56  |
| Объем подачи контейнеров                                                         | конт. / сут         | 112 | 112 | 112 | 112 |
| Количество вагонов в одной подаче                                                | вагон / подача      | 8   | 10  | 12  | 14  |
| Количество подач вагонов                                                         | подача / сут        | 7   | 5,6 | 4,7 | 4   |
| Время подачи-уборки одной партии вагонов                                         | ч                   | 3,4 | 4,3 | 5,1 | 6,0 |

<sup>1</sup> В расчетах принята норма обработки партии вагонов в 1 час.

Таблица 2  
(Окончание)

| Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожного грузового фронта терминала |           |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|------|------|------|------|
| Время цикла ричстакера по выгрузке и погрузке контейнера                          | мин       | 20   | 20   | 20   | 20   |
| Производительность ричстакера в час                                               | конт./ч   | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Производительность ричстакера в сутки (от количества подач)                       | конт./сут | 21,0 | 16,8 | 14,0 | 12,0 |
| Количество ричстакеров для обработки поезда                                       | ед.       | 5,3  | 6,7  | 8,0  | 9,3  |

Время подачи-уборки вагонов на терминал обработки приводит к сокращению суммарного времени на их обработку в силу недопущения появления необработанных заявок, что может привести к перегрузке системы обслуживания и нарушению ритма обработки (56 платформ в сутки). В результате изменится также потребность в количестве каналов обслуживания подвижного состава (рис. 3).

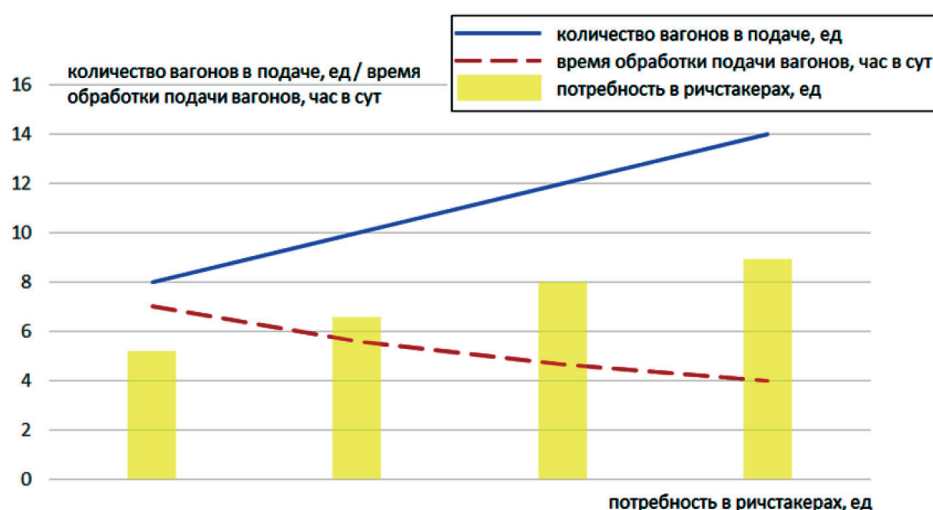


Рис. 3. Влияние партии вагонов в одной подаче на потребное количество каналов их обслуживания

При обработке морского судна время цикла фронтального перегружателя зависит от его эксплуатационных характеристик, т. е. является случайной величиной. При этом именно от времени цикла зависит потребное количество перегружателей, призванных задать ритмичность всего процесса.

Неравномерную загрузку системы массового обслуживания при изменении времени цикла перегружателя можно компенсировать увеличением количества буксировщиков контейнеров на причал (табл. 3).

Таблица 3

**Зависимость потребности в перегрузочном оборудовании от времени цикла фронтального перегружателя как основного параметра системы массового обслуживания**

| Оценка эксплуатационных характеристик морского грузового фронта терминала |             |       |       |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|-------|------|------|
| Грузоподъемность судна                                                    | т           | 6000  | 6000  | 6000 | 6000 |
| Время цикла портального перегружателя                                     | мин         | 10    | 12    | 14   | 16   |
| Производительность портального перегружателя в час                        | конт. / ч   | 6,0   | 5,0   | 4,3  | 3,8  |
| Производительность портального перегружателя в сутки (21 ч)               | конт. / сут | 126,0 | 105,0 | 90,0 | 78,8 |
| Количество портальных перегружателей для обработки судна                  | ед.         | 2,6   | 3,2   | 3,7  | 4,2  |
| Время обработки судна                                                     | сут         | 1     | 1     | 1    | 1    |

Таблица 3  
(Окончание)

| <i>Динамика изменений эксплуатационных характеристик внутреннего транспорта</i> |             |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|
| Время цикла подачи контейнера на причал буксировщиком                           | мин         | 30  | 30  | 30  | 30  |
| Производительность внутреннего транспорта                                       | конт. / ч   | 2   | 2   | 2   | 2   |
| Производительность внутреннего транспорта (21 ч)                                | конт. / сут | 42  | 42  | 42  | 42  |
| Потребное количество буксировщиков на один перегружатель                        | ед.         | 3   | 2,5 | 2,1 | 1,9 |
| Потребное количество буксировщиков на причал                                    | ед.         | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |

Неравномерную загрузку системы массового обслуживания при подаче под обработку морских судов различной грузоподъемности можно компенсировать увеличением количества фронтальных перегружателей и обслуживающих их работу буксировщиков контейнеров на причал (табл. 4).

Таблица 4

**Зависимость потребности в перегрузочном оборудовании от грузоподъемности подаваемых под обработку морских судов как основного параметра системы массового обслуживания**

| <i>Оценка эксплуатационных характеристик морского грузового фронта терминала</i> |           |       |       |      |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|------|------|
| Грузоподъемность судна                                                           | т         | 6000  | 6500  | 7000 | 7500 |
| Время цикла портального перегружателя                                            | мин       | 10    | 12    | 14   | 16   |
| Производительность портального перегружателя в час                               | конт./ч   | 6,0   | 5,0   | 4,3  | 3,8  |
| Производительность портального перегружателя в сутки (21 ч)                      | конт./сут | 126,0 | 105,0 | 90,0 | 78,8 |
| Количество портальных перегружателей для обработки судна                         | ед.       | 2,6   | 3,4   | 4,3  | 5,3  |
| Время обработки судна                                                            | сут       | 1     | 1     | 1    | 1    |
| <i>Динамика изменений эксплуатационных характеристик внутреннего транспорта</i>  |           |       |       |      |      |
| Время цикла подачи контейнера на причал буксировщиком                            | мин       | 30    | 30    | 30   | 30   |
| Производительность внутреннего транспорта                                        | конт./ч   | 2     | 2     | 2    | 2    |
| Производительность внутреннего транспорта (21 ч)                                 | конт./сут | 42    | 42    | 42   | 42   |
| Потребное количество буксировщиков на один перегружатель                         | ед.       | 3     | 2,5   | 2,1  | 1,9  |
| Потребное количество буксировщиков на причал                                     | ед.       | 7,9   | 8,6   | 9,3  | 9,9  |

При неизменном количестве фронтальных перегружателей неравномерную загрузку системы массового обслуживания может задать время их цикла при погрузке судна (табл. 5).

Таблица 5

**Зависимость времени обработки морского судна от времени цикла контейнерного перегружателя как основного параметра системы массового обслуживания**

| <i>Оценка эксплуатационных характеристик морского грузового фронта терминала</i> |             |       |       |      |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|-------|------|------|
| Грузоподъемность судна                                                           | т           | 7000  | 7000  | 7000 | 7000 |
| Время цикла портального перегружателя                                            | мин         | 10    | 12    | 14   | 16   |
| Производительность портального перегружателя в час                               | конт./ч     | 6,0   | 5,0   | 4,3  | 3,8  |
| Производительность портального перегружателя в сутки (21 ч)                      | конт. / сут | 126,0 | 105,0 | 90,0 | 78,8 |
| Количество портальных перегружателей для обработки судна                         | ед.         | 3,0   | 3,0   | 3,0  | 3,0  |
| Время обработки судна                                                            | сут         | 1,0   | 0,8   | 0,7  | 0,6  |
| <i>Динамика изменений эксплуатационных характеристик внутреннего транспорта</i>  |             |       |       |      |      |
| Время цикла подачи контейнера на причал буксировщиком                            | мин         | 30    | 30    | 30   | 30   |
| Производительность внутреннего транспорта                                        | конт / ч    | 2     | 2     | 2    | 2    |
| Производительность внутреннего транспорта (21 ч)                                 | конт / сут  | 42    | 42    | 42   | 42   |
| Потребное количество буксировщиков на один перегружатель                         | ед.         | 3     | 2,5   | 2,1  | 1,9  |
| Потребное количество буксировщиков на причал                                     | ед.         | 9,0   | 7,5   | 6,4  | 5,6  |

Таким образом, при неизменном количества каналов обслуживания морского судна даже увеличение объемов подачи контейнеров на причал приведет к сокращению времени погрузки (рис. 4).

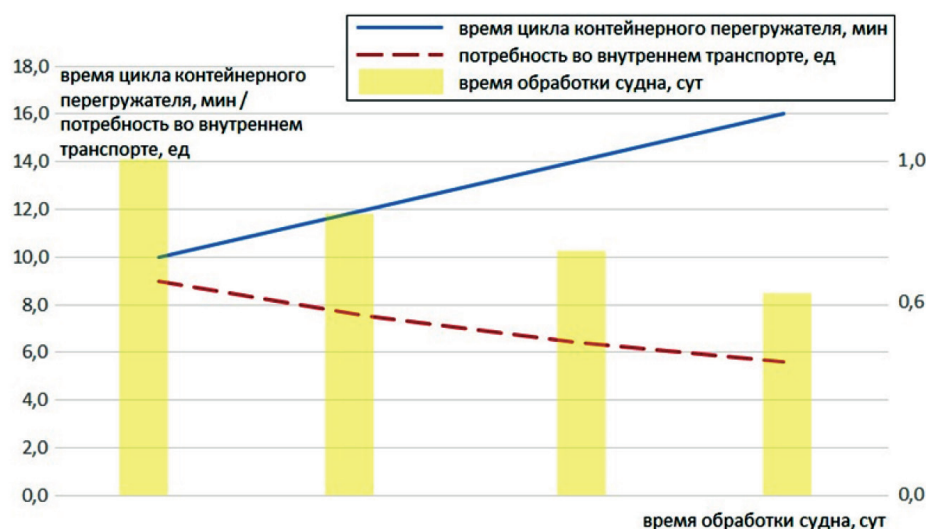


Рис. 4. Влияние продолжительности цикла контейнерного перегружателя на время обработки морского судна

При этом важно отметить, что выделенные в начале исследования две подсистемы, необходимые для обработки на морском терминале удобрений в насыпных контейнерах, в силу отличного друг от друга ритма работ требуют создания разного количества каналов обслуживания грузопотоков [8]. Таким образом, необходимо организовать определенное количество мест выгрузки, погрузки и перегрузки на каждом выявленном фронте работ. Общая интенсивность работ на терминале при этом задается возможностью подачи платформ с железнодорожной станции и морского судна под погрузку [9, 10].

### Заключение (Conclusion)

Расчет требуемого количества перегрузочного оборудования на грузовых фронтах терминала позволяет сформировать  $n$  каналов обслуживания в описанной системе массового обслуживания и выявить зависимости скорости обработки грузопотока от эксплуатационных характеристик предпортовой железнодорожной станции, фронтального перегружателя, средств механизации технологических операций по складированию и внутритерминальному перемещению большегрузных контейнеров. Достоверная оценка возможностей перегрузочного оборудования терминала дает возможность организовать систему массового обслуживания без ожидания обслуживания в очереди, т. е. с заданной интенсивностью, что позволяет не затрагивать вопросы расчета вероятности простоя системы массового обслуживания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215. — EDN HRYNBC.
2. Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.



3. Жендарева Е. С. Методические особенности оценки эффективности организации транспортного процесса доставки нерудных строительных материалов / Е. С. Жендарева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 122–125. — EDN PBMUYR.
4. 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.
5. Зимин А. В. Повышение гибкости управления предприятием за счет современных средств математического моделирования и визуализации данных / А. В. Зимин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2015. — Т. 15. — № 1. — С. 69–74. — EDN TGZUNV.
6. Забненков В. С. Концептуальный подход к созданию логистического центра в пунктах взаимодействия железнодорожного и водного транспорта / В. С. Забненков // Речной транспорт (XXI век). — 2011. — № 6(54). — С. 64–69. — EDN RUKBXX.
7. 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.
8. Ветрова Е. Н. Методические подходы к локализации промышленного производства на современном этапе / Е. Н. Ветрова, Г. С. Азирова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2023. — № 1. — С. 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12. — EDN QYCLSD.
9. Калентьева Ю. Н. Проблема применения системного подхода и системного анализа в принятии управленческих решений / Ю. Н. Калентьева // Экономика, управление, финансы: материалы IX Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20–23 октября 2018 года. — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2018. — С. 44–46. — EDN YLEEVV.
10. Балашова И. В. Системы поддержки принятия решений / И. В. Балашова, Т. А. Терещенко // The Scientific Heritage. — 2021. — № 79–4(79). — С. 3–7. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7. — EDN VBGSSEN.

## REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Zhendareva, E. S. “Methodical features of the transport process of evaluating the effectiveness of delivery of non-metallic construction materials.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2012): 122–125.
4. Izotov, Oleg A. “Modeling of bulk container handling schemes at the 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.
5. Zimin, A. V. “Agility increase of enterprise management by modern methods of mathematical modelling and data visualisation.” *Bulletin Of The South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics* 15.1 (2015): 69–74.
6. Zabnenkov, V. S. “Kontseptual'nyy podkhod k sozdaniyu logisticheskogo tsentra v punktakh vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i vodnogo transporta.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 6(54) (2011): 64–69.
7. Shibzukhov, T. A., K. D. Savel'eva, N. L. Galieva and A. V. Eriчев. “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.
8. Vetrova, E. N. and G. S. Azirov. “Methodological approaches to the localization of industrial production at the present stage.” *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskii menedzhment* 1 (2023): 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12.
9. Kalent'eva, Yu. N. “Problema primeneniya sistemnogo podkhoda i sistemnogo analiza v prinyatii upravlencheskikh resheniy.” *Ekonomika, upravlenie, finansy: materialy IX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 20–23 oktyabrya 2018 goda*. Sankt-Peterburg: Svoe izdatel'stvo, 2018: 44–46.
10. Balashova, I. V. and T. A. Tereshchenko. “Decision support systems.” *The Scientific Heritage* 79–4(79) (2021): 3–7. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7.

**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](mailto:iztv65@rambler.ru), [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

**Полуботко Никита Сергеевич** — аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [nipolubotko@inbox.ru](mailto:nipolubotko@inbox.ru)

**Марушкина Екатерина Евгеньевна** —

инженер-технолог 2 категории

ООО «СПКБ», специалист

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова» 198035,

Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [marushkina\\_ee@mail.ru](mailto:marushkina_ee@mail.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](mailto:iztv65@rambler.ru), [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

**Polubotko, Nikita S.** — postgraduate student

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: [nipolubotko@inbox.ru](mailto:nipolubotko@inbox.ru)

**Marushkina, Ekaterina E.** —

2nd category engineer-technologist

of SPKB LLC, expert

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,

198035, Russian Federation

e-mail: [marushkina\\_ee@mail.ru](mailto:marushkina_ee@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 02 июня 2025 г.*

*Received: June 02, 2025.*

## DEVELOPMENT OF MAIN REQUIREMENTS FOR THE OPERATING SYSTEMS OF AN AUTOMATIC TUGBOAT FOR ESCORTING A MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIP

**V. V. Zaslونov<sup>1</sup>, S. S. Zhuk<sup>1</sup>, E. O. Ol'khovik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Admiral Ushakov Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

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

*This article discusses the requirements for the main operating systems of an automatic tugboat designed to perform escort, mooring, and unmooring operations for vessels in port waters. The relevance of the work stems from the need to increase the safety and efficiency of port operations through the introduction of autonomous technologies. The architectural and structural features of the automatic tugboat, which ensure high maneuverability and operational reliability, are presented. Particular attention is paid to the key functional systems: the automatic navigation system and the situational awareness system. Mathematical models and algorithms are proposed for analyzing the navigation situation, adjusting routes, ensuring safe separation from other vessels, as well as methods for integrating data from various information sources (high-precision navigation systems, AIS, radar, log) using the Kalman filter. Requirements for the propulsion system with azimuth thrusters, the power supply system with redundancy, the rigid coupling system (including magnetic devices), and the emergency towing system are also described. The study results aim to create a safe, reliable, and highly automated automatic tugboat capable of effectively interacting with the environment and performing complex maneuvers in confined conditions.*

*Keywords: automatic tugboat, automatic navigation system, situational awareness system, safe separation, route correction, maneuverability characteristics, propulsion system, rigid coupling, power supply, emergency towing.*

### For citation:

Zaslونov, Vladimir V., S. S. Zhuk and E. O. Ol'khovik. "Development of main requirements for the operating systems of an automatic tugboat for escorting a maritime autonomous surface ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 502–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-502-514.

**УДК 656.61.052**

## РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БУКСИРА-АВТОМАТА ДЛЯ ПРОВОДКИ МОРСКОГО АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

**В. В. Заслонов<sup>1</sup>, С. С. Жук<sup>1</sup>, Е. О. Ольховик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова,  
Новороссийск, Российская Федерация

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

*В обзорной статье рассмотрены требования к основным системам функционирования буксира-автомата, предназначенного для выполнения операций сопровождения, швартовки и отшвартовки судов в портовых водах. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения безопасности и эффективности портовых операций за счет внедрения автономных технологий. Представлены архитектурно-конструктивные особенности буксира-автомата, обеспечивающие высокую маневренность и эксплуатационную надежность. Особое внимание уделено ключевым функциональным системам: автоматической навигационной системе и системе ситуационной осведомленности. Предложены математические модели и алгоритмы для анализа навигационной обстановки, корректировки маршрута, обе-*

спечения безопасного расхождения с другими судами, а также методы интеграции данных, полученные из различных источников информации (системы высокоточной навигации, АИС, РЛС, лаг) с использованием фильтра Калмана. Также описаны требования к пропульсивной системе с азимутальными движителями, системе энергообеспечения с резервированием, системе жесткой сцепки, включая магнитные устройства, а также системе аварийной буксировки. Результаты исследования направлены на создание безопасного, надежного и высокоавтоматизированного буксира-автомата, способного эффективно взаимодействовать с окружающей средой и выполнять сложные маневры в стесненных условиях.

**Ключевые слова:** буксир-автомат, автоматическая навигационная система, система ситуационной осведомленности, безопасное расхождение, корректировка маршрута, маневренные характеристики, пропульсивная система, жесткая сцепка, энергообеспечение, аварийная буксировка.

**Для цитирования:**

Заслонов В. В. Разработка основных требований к системам функционирования буксира-автомата для проводки морского автономного надводного судна / В. В. Заслонов, С. С. Жук, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 502–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-502-514. — EDN EYXMDP.

### **Введение (Introduction)**

Буксиры-автоматы (БА) предназначены для выполнения операций по буксировке (сопровождению) морского судна, включая проводку в акватории порта, обеспечение маневрирования в районе причала и выполнение швартовных операций [1].

БА должен быть спроектирован согласно действующим правилам и нормам Российского морского регистра судоходства (РС). В портах, где необходимо учитывать ледовую обстановку, должны эксплуатироваться БА соответствующего ледового класса. Ледовый класс БА (Ice2, Ice3, Arc4, Arc5, Arc6) должен быть выбран, согласно Правилам РС, Обязательным постановлениям порта и особенностям организации плана швартовных операций для конкретного порта.

Большой вклад для практического внедрения автономного судоходства благодаря своим исследованиям внесли: В. Г. Сенченко, Д. Е. Студеникин, С. В. Смоленцев, А. Б. Крючков, В. В. Ключев и др. На основе анализа работ [1–10] можно сделать вывод о техническом и технологическом составе систем БА. Например, корпус рассматриваемого инновационного судна должен отличаться от строящихся, так как он должен обеспечивать большую надежность ввиду отсутствия людей на борту, что, в свою очередь, выгодно отличает его от аналогичных судов. Такой БА должен обеспечить высокую маневренность, а также устойчивость ко всем видам качек. С целью достижения данных аспектов исследователи предлагают концептуальные варианты, проверенные с помощью имитационных, модельных и практических экспериментов. Кроме того, установлено, что основным элементом, оказывающим влияние в том числе на форму ее корпуса, является швартовное устройство, которое должно обеспечивать совместно движение судов при эскортировании, постановке и оттяжке грузового судна от причала. На основании проведенного анализа оптимальным и эффективным решением является применение жесткой сцепки в швартовном механизме на основе электромагнетизма.

Целью данного исследования является разработка и обоснование требований, предъявляемых к основным функциональным системам автономного БА, предназначенного для выполнения операций проводки и швартовки транспортных судов в условиях акватории морского порта.

Частные задачи исследования:

- анализ архитектурно-конструктивных особенностей БА, обеспечивающих высокую маневренность и устойчивость;
- формулирование требований к ключевым функциональным системам БА, включая автоматическую навигационную систему и систему ситуационной осведомленности;
- разработка математических моделей и алгоритмов для анализа навигационной обстановки, корректировки маршрута и обеспечения безопасного расхождения с другими судами;
- описание требований к системам управления движением, энергообеспечению, жесткой сцепке и аварийной буксировке;

– исследование методов интеграции данных от различных навигационных и информационных датчиков для повышения точности и достоверности информации в системах буксира-автомата.

Предметом исследования являются процессы функционирования БА в условиях портовой акватории, основные функциональные системы БА, обеспечивающие его автономное и безопасное маневрирование, включая автоматическую навигационную систему, систему ситуационной осведомленности, пропульсивную систему, систему энергообеспечения, систему жесткой сцепки и систему аварийной буксировки.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

По архитектурно-конструктивному типу БА должен представлять собой азимутальное однокорпусное судно, включая:

- U-образный корпус с вертикальным килем и развитой подошвой;
- U-образные обводы, симметричные относительно ДП и ПМШ с плоскими вертикальными бортами;
- плоскую палубу без бака и юта, без жилой надстройки;
- наибольшую ширину по КВЛ с симметричными баком и кормой;
- вертикальный киль с подкреплениями (горизонтальная часть киля должна соответствовать ширине БА для создания дополнительного упора);
- размещение электрооборудования в средней части корпуса;
- место для размещения ВРК в ДП в районе бака и кормы.

Компоновка корпуса буксира должна быть выполнена с таким расчетом, чтобы обеспечить движение носом и кормой с равной степенью эффективности (рис. 1) [2].

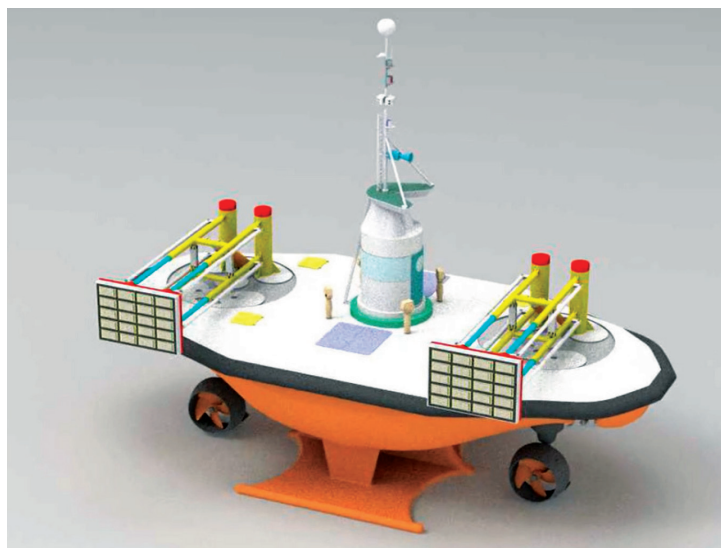


Рис. 1. Базовый концепт буксира-автомата

В данной работе принято, что основными системами БА являются:

- автоматическая навигационная система (АНС);
- система ситуационной осведомленности (ССО);
- система контроля и управления техническими средствами (СКУТС);
- система связи;
- пропульсивная система (ВРК);
- система энергообеспечения;
- система жесткой сцепки (к транспортному судну и к месту стоянки);
- система аварийной буксировки БА (другим / другого БА в аварийном режиме).



Рассмотрим требования, предъявляемые к основным системам: автоматической навигационной системе (АНС) и системе ситуационной осведомленности (ССО), системе контроля и управления техническими средствами (СКУТС).

**Автоматическая навигационная система (АНС).** Должна решать задачи навигации и обеспечивать навигационную безопасность плавания в автономном режиме (кроме случаев движения в жесткой сцепке с транспортным судном) с учетом гидрометеорологических условий и условий ограниченной видимости. При этом навигация должна обеспечиваться в стесненных условиях, когда БА ограничен в маневре из-за близости берегов, гидротехнических сооружений, пришвартованных судов, недостаточных глубин и других навигационных опасностей, а также интенсивного судоходства [3].

В состав АНС должны входить следующие функциональные блоки:

- модуль обеспечения навигации и маневрирования;
- модуль электронной картографической навигационной информационной системы.

Модуль обеспечения навигации и маневрирования должен обеспечивать:

- автоматическое решение задачи анализа и оценки навигационной обстановки;
- учет маневренных характеристик буксира-автомата;
- корректировку маршрута плавания БА, с учетом навигационной обстановки и гидрометеороусловий;
- безопасное расхождение с надводными целями в соответствии с МППСС-72 и местными правилами плавания;
- расчет параметров управления курсом и скоростью БА, обеспечивающих движение по заданному маршруту в соответствии с оперативным планом.

Модуль электронной картографической навигационной информационной системы должен предоставлять информацию о районе плавания в модуль обеспечения навигации и маневрирования для принятия им решений с учетом картографических данных (рис. 2).

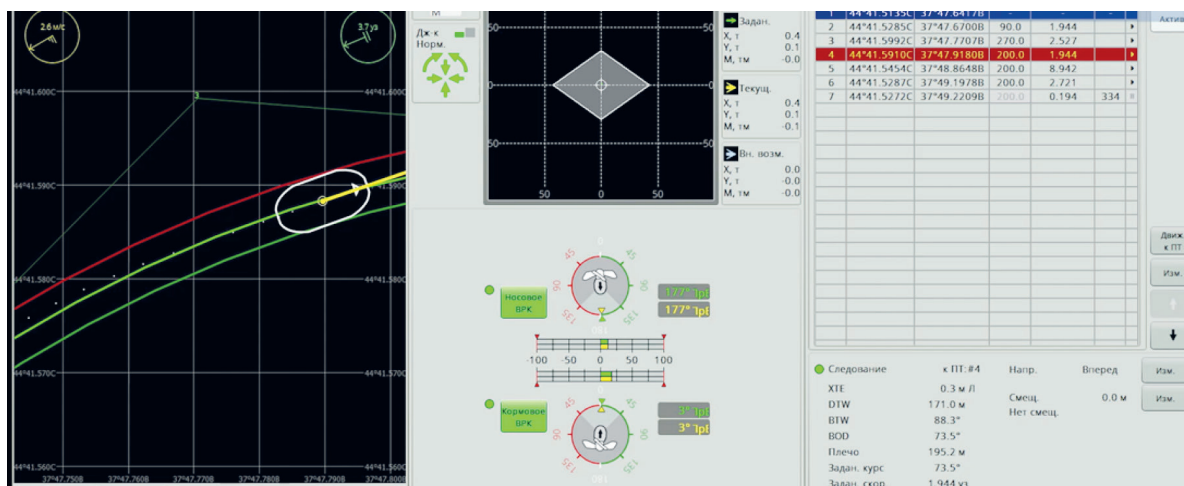


Рис. 2. Пример реализации функциональной панели автоматической навигационной системы буксира-автомата в рамках разработки ПДСП буксира-автомата ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова совместно с ООО «Сим Тех» и АО «НАВИС»

### Базовые инструменты реализации АНС

**Модуль обеспечения навигации и маневрирования.** Отвечает за анализ навигационной обстановки, учет маневренных характеристик БА, корректировку маршрута и обеспечение безопасного расхождения с другими судами [4]. Математически это можно описать с использованием дифференциальных уравнений движения БА.

**Уравнение движения буксира-автомата.** Движение БА в плоскости описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos(\psi(t)); \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin(\psi(t)); \\ \dot{\psi}(t) = r(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x(t), y(t)$  — координаты буксира в декартовой системе координат;

$v(t)$  — скорость буксира;

$\psi(t)$  — курсовой угол (угол между направлением движения и осью  $x$ );

$r(t)$  — угловая скорость поворота буксира.

**Корректировка маршрута.** Производится на основе анализа текущей навигационной обстановки. Пусть  $P_i(x_i, y_i)$  — точки маршрута, заданные в оперативном плане. Тогда отклонение от маршрута описывается следующим образом:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \quad (2)$$

Если  $d_i > d_{\text{крит}}$ , где  $d_{\text{крит}}$  — допустимое отклонение, то маршрут корректируется. Новое направление движения вычисляется в виде

$$\psi_{\text{нов}} = \arctan \left( \frac{y_i - y}{x_i - x} \right). \quad (3)$$

**Обеспечение безопасного расхождения.** Для обеспечения безопасного расхождения с другими судами используется модель предсказания траекторий. Пусть  $(x_j, y_j)$  — координаты другого судна,  $v_j, \psi_j$  — его скорость и курс. Минимальное безопасное расстояние  $D_{\text{безоп}}$  определяется в виде

$$D_{\text{безоп}} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} - R_{\text{безоп}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{безоп}}$  — радиус безопасной зоны.

Если  $D_{\text{безоп}} < 0$ , то необходимо изменение курса или скорости.

**Модуль электронной картографической навигационной информационнои системы.** Предоставляет информацию о районе плавания. Карта представляется в виде сетки точек  $(x_k, y_k)$ , где каждая из них имеет характеристики: глубину, тип дна, наличие навигационных опасностей. Интерполяция данных выполняется с использованием метода билинейной интерполяции:

$$z(x, y) = z_{11}(1-u)(1-v) + z_{12}(1-u)v + z_{21}u(1-v) + z_{22}uv, \quad (5)$$

где  $z_{ij}$  — значения атрибутов в узлах сетки;

$$u = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1};$$

$$v = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}.$$

**Система ситуационной осведомленности (ССО).** Предназначена для сбора и обработки данных об условиях окружающей среды и о состоянии БА, а также его подсистем, необходимых для принятия верного и своевременного решения по управлению БА [5, 6].

Состав минимального набора источников информации для ССО БА: система высокоточной навигации, АИС, РЛС, двухосевой лаг, оптическая система анализа окружающей обстановки, лидары.

Требования к ССО

1. Объединение всех доступных источников информации, расположенных на БА и вне его, использующих оперативную и хронологическую информацию (координаты, курс, скорость, крен и углы бортовой качки, дифферент и углы килевой качки, параметры бортовых систем БА, состояние систем связи, положение точки Pivot Point, положения точки вращения БА / ордера, значения угловой скорости поворота БА / ордера, текущие координаты характерных точек корпуса БА /

ордера, информация об окружающих судах в районе проведения операции сопровождения транспортно-портного судна).

2. Обеспечение своевременности и достоверности ситуационной информации, необходимой для принятия верного и своевременного решения по управлению БА.

3. Информация, воспринимаемая и получаемая ССО БА при любом сценарии эксплуатации, должна передаваться в автономную навигационную систему (АНС) и в ЦДУ в режиме реального времени.

4. Оборудование и составные части ССО должны быть достаточно надежными для минимизации вероятности отказа. Оборудование системы ситуационной осведомленности должно быть укомплектовано и скомпоновано таким образом, чтобы не была нарушена его способность к восприятию информации либо в случае одиночного отказа оборудования она могла быть восстановлена в кратчайшие сроки для продолжения эксплуатации БА.

5. Оборудование системы ситуационной осведомленности должно иметь функции самодиагностики и сигнализации и обеспечивать непрерывный контроль во время нормальной эксплуатации оборудования. В случае обнаружения отказа оборудования должна быть обеспечена возможность его регистрации и передачи тревожного сообщения и сообщения об отказе в АНС и ЦДУ.

6. В случае отказов ССО БА, приводящих к нарушению способности восприятия обстановки во время навигации, АНС должна быть выполнена оценка необходимости перехода в состояние минимального риска, и в ЦДУ должна быть передана соответствующая тревожная информация.

7. Традиционные системы, являющиеся источниками информации для ССО БА, должны удовлетворять соответствующим требованиям РС.

8. Диапазон измерения, точность и временная задержка оборудования для обнаружения на близком расстоянии должны удовлетворять требованиям оперативности принятия решения при выполнении швартовных операций и движении в портовых водах;

9. Все оборудование ССО БА должно осуществлять сбор данных в режиме реального времени в соответствии с требованием о своевременном принятии решения.

10. ССО БА должна быть снабжена достаточным количеством датчиков и систем для определения, отображения и регистрации текущего времени, местоположения, ориентации и движения по отношению к Земле и скорости изменения параметров, измеренных с соответствующим интервалом и точностью, достаточными для обеспечения безопасности навигации;

11. Система высокоточной навигации должна обеспечивать непрерывную выработку информации о курсе, координатах, скорости движения и параметрах угловой ориентации БА.

12. С целью обеспечения избыточности информации определения местоположения БА могут быть использованы радионавигационные системы наземного базирования.

13. ССО может включать систему распознавания окружающей обстановки на базе радиолокации, обеспечивающей достаточный уровень пространственного разрешения для реализации режима радиовидения.

14. ССО должна включать средства, обеспечивающие получение непрерывного видеоизображения вокруг БА, способных к эксплуатации в сложных метеорологических условиях и в разных условиях суточной освещенности.

15. ССО собирает и обрабатывает данные об окружающей среде и состоянии БА. Взаимодействие элементов системы описывается через модели интеграции данных [7, 8].

*Объединение источников информации для ССО БА.* Пусть  $S_i(t)$  — сигнал от  $i$ -го источника информации ( $i = 1, \dots, N$ ). Общий вектор состояния системы  $S(t)$  формируется в виде

$$S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t)]. \quad (6)$$

Интеграция данных выполняется с использованием фильтра Калмана для устранения шумов и повышения точности:

$$\hat{S}(t) = \hat{S}(t-1) + K(t)(S(t) - H\hat{S}(t-1)), \quad (7)$$

где  $\hat{S}(t)$  — оценка состояния системы;  
 $K(t)$  — матрица усиления Калмана;  
 $H$  — матрица наблюдений.

*Определение положения буксира.* Положение буксира определяется с использованием данных от системы высокоточной навигации. Пусть  $(x_{\text{GPS}}, y_{\text{GPS}})$  — координаты, полученные от GPS, а  $(x_{\text{INS}}, y_{\text{INS}})$  — координаты от инерциальной навигационной системы [6]. Итоговые координаты вычисляются как взвешенная сумма:

$$x = w_{\text{GPS}} \cdot x_{\text{GPS}} + w_{\text{INS}} \cdot x_{\text{INS}}; \quad (8)$$

$$y = w_{\text{GPS}} \cdot y_{\text{GPS}} + w_{\text{INS}} \cdot y_{\text{INS}},$$

где  $w_{\text{GPS}}$  и  $w_{\text{INS}}$  — весовые коэффициенты, зависящие от точности источников.

*Оценка параметров движения.* Параметры движения (курс, скорость, углы крена и дифферента) оцениваются с использованием датчиков [9, 10]. Угловая скорость поворота  $\omega$  вычисляется в виде

$$\omega = \frac{\Delta\psi}{\Delta t}, \quad (9)$$

где  $\Delta\psi$  — изменение курсового угла за время  $\Delta t$ .

*Взаимодействие АНС и ССО.* АНС использует данные от ССО для принятия решений. Передача данных между системами описывается в виде

$$D_{\text{АНС}}(t) = f(D_{\text{ССО}}(t)), \quad (10)$$

где  $D_{\text{ССО}}(t)$  — данные от ССО;

$f(\cdot)$  — функция обработки данных.

Примером такой функции может быть фильтрация данных для устранения выбросов:

$$f(D) = \begin{cases} D, & \text{если } |D - \bar{D}| \leq \sigma; \\ \bar{D}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

где  $D$  — среднее значение;

$\sigma$  — пороговое отклонение.

**Система контроля и управления техническими средствами (СКУТС).** Предназначена для контроля работы всех технических средств БА в реальном времени и управления исполнительными механизмами БА [7–АКБ10].

Требования к СКУТС:

- мониторинг состояния технических средств БА и передача этих данных в ССО;
- обеспечение бесперебойного управления всеми техническими средствами БА;
- возможность восстановления работы всех технических средств БА после сбоев (связи, питания) в режим готовности;
- обеспечение выполнения управляющих команд от АНС при автономном движении БА;
- обеспечение выполнения управляющих команд от модуля управления групповым поведением (МУГП) МУГП центра дистанционного управления (ЦДУ) для режима дистанционного управления БА и дистанционного / автономного управления движением ордера;
- обеспечение в аварийной ситуации выключения ВРК и перевод швартовых устройств в положение для буксировки (гидравлика выдвигается и опускается).

*Система связи.* Предназначена для обеспечения стабильной, безопасной и непрерывной связи БА с центром дистанционного управления (ЦДУ) и другими компонентами СОАПШ.

Система связи БА должна:

- иметь возможность многоканальной передачи данных — поддержка нескольких каналов связи (УКВ радиосвязь, сотовая сеть, Wi-Fi (WiMax), Ethernet (локальная сеть БА, береговая инфраструктура)) для увеличения надежности;

- автоматически переключаться на резервные каналы — в случае потери основного канала связи позволяет сохранять контакт с буксиром (например, при выходе из зоны действия сотовой связи или повреждении оборудования);

- обеспечивать конфиденциальность данных — все передаваемые данные, включая команды управления и телеметрию, шифруются для предотвращения их перехвата или несанкционированного вмешательства;

- обеспечивать предотвращение потери данных — при потере канала связи обеспечивает накопление данных, а при восстановлении канала связи система автоматически передает накопленные данные в ЦДУ, чтобы сохранить полную картину происходящего в журнале событий;

- передавать в ССО БА информации о состоянии всех каналов связи.

*Пропульсивная система БА.* Предназначена для обеспечения высокой маневренности БА и выполнения тяговых усилий в любом направлении<sup>1</sup> (рис. 3) [11].

Требования к пропульсивной системе БА:

- должно соблюдаться расположение ВРК в диаметральной плоскости буксира, что позволяет совершать тяговые усилия в любом направлении;

- 360-градусное управление направлением тяги — винторулевые колонки (ВРК) должны поворачиваться вокруг вертикальной оси на 360°, что позволяет изменять направление тяги и обеспечивает высокую точность маневрирования, включая возможность поворота вокруг своей оси;

- работа ВРК должна обеспечиваться электроприводом, что позволяет плавно регулировать мощность и направление тяги, обеспечивая высокую точность маневрирования и минимизацию задержек при смене направления движения;

- возможность раздельного управления каждой рулевой колонкой, благодаря которой в зависимости от задачи каждая ВРК может работать независимо (например, при одиночном движении для экономии заряда может работать только одна ВРК).



Рис. 3. Внешний вид пропульсивной системы БА

*Система энергообеспечения.* Предназначена для обеспечения бесперебойного электропитания всех систем БА (рис. 4) [9–11].

Требования к системе энергообеспечения:

- использование необслуживаемых аккумуляторных батарей (АКБ), повышающее надежность эксплуатации БА;

- использование тяговых АКБ, обеспечивающее устойчивое электропитание даже при длительной высокой нагрузке, что важно для выполнения задач буксировки судов;

- мониторинг состояния каждой ячейки АКБ — оснащение системы датчиками, которые позволяют отслеживать такие параметры, как напряжение, температура и уровень заряда каждой ячейки;

- наличие основного и резервного блоков АКБ — основной блок АКБ обеспечивает постоянную подачу электроэнергии на все системы буксира, резервный (аварийный) источник включается в случае выхода из строя основного, обеспечивая бесперебойное электроснабжение критически

<sup>1</sup> Hensen H. Tug use in port. A practical guide. 2-nd edition / H. Hensen. Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. — 192 p.; Tugs and Tows — A Practical Safety and Operational Guide. Luxembourg: The Shipowners' Mutual Protection and Indemnity Association, 2015. 90 p.



важных систем, управления движением и связи на время, необходимое для безопасного завершения текущей операции и перехода БА в аварийный режим.

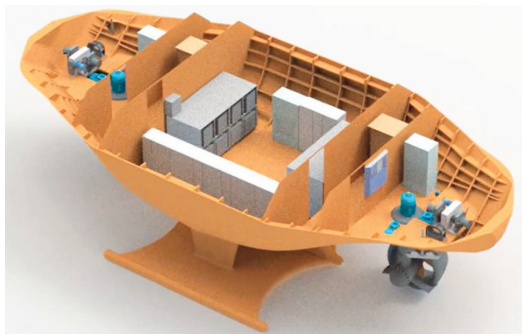


Рис. 4. Концептуальный пример реализации системы энергообеспечения в рамках требований Регистра РФ (центральный отсек занят системой АКБ и щитами)

*Система жесткой сцепки БА.* Предназначена для надежного и безопасного соединения БА с транспортным судном и местом стоянки (рис. 5) [12–14]. Может быть реализована с использованием двух поворотных швартовых устройств (ПШУ). Для стыковки с корпусом судна могут быть использованы ПШУ на основе различных технологий: магнитных, вакуумных, механических.

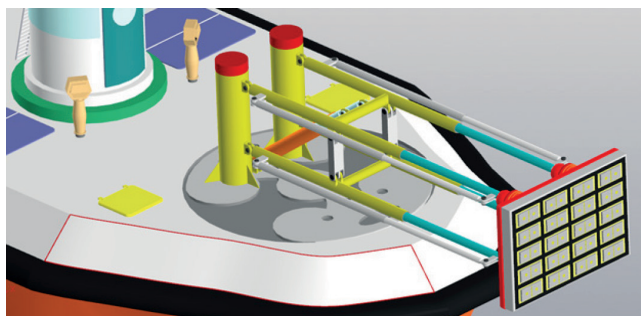


Рис. 5. Концептуальная реализация ПШУ на основе магнитов

Требования к системе жесткой сцепки БА:

- два ПШУ должны быть расположены на баке и корме БА, что позволяет совершать тяговые и толкательные усилия как при расположении лагом к транспортному судну, так и баком / кормой (стыковка одним ПШУ);
- каждый ПШУ должен иметь возможность поворачиваться в горизонтальной плоскости на 360°;
- ПШУ должно иметь не менее шести степеней свободы для компенсации вертикальных и боковых колебания БА;
- ПШУ должно иметь гидравлический привод для обеспечения плавности движения ПШУ и предотвращения повреждения корпуса транспортного судна, находящегося в жесткой сцепке с БА, от резкого изменения внешних воздействий;
- сила сцепления БА с судном не должна превышать тяговое усилие БА;
- удерживающее усилие должно быть равномерно распределено по секциям ПШУ.

Дополнительные требования к ПШУ с технологией магнитной стыковки:

- магнитная секция ПШУ должна обладать достаточной мощностью для удержания транспортного судна при работе на оттяжку;
- ПШУ должно иметь минимальную остаточную намагниченность, так как это обеспечивает безопасную отстыковку БА от судна, а также минимизирует риск воздействия магнитных полей на персонал при выполнении сервисных работ;

– магниты, используемые в ПШУ, должны иметь малую глубину проникновения магнитного поля, что исключает риск воздействия магнитного поля на бортовое оборудование, чувствительный к магнитному полю груз и экипаж транспортного судна.

*Система аварийной буксировки БА.* Предназначена для обеспечения безопасной буксировки неисправного БА другим БА в аварийных ситуациях [12].

Требования к системе аварийной буксировки БА:

- при аварийном режиме гидравлика неисправного БА должна выдвигаться и опускаться, обеспечивая таким образом возможность стыковки;
- в аварийном режиме ВРК буксируемого БА должны быть отключены;
- система аварийной буксировки должна позволять стыковаться с аварийным БА при отсутствии в нем питания.

### Заключение (Conclusion)

В ходе выполнения работы на основании сформулированных требований к системам автономного БА были разработаны математические модели его ключевых систем, таких как автоматическая навигационная система и система ситуационной осведомленности. Для АНС предложены уравнения движения, методы корректировки маршрута и расчета параметров управления курсом и скоростью. Для ССО описаны алгоритмы объединения данных от различных источников, включая системы высокоточной навигации, АИС, РЛС и лаг. Интеграция данных реализована с использованием фильтра Калмана для повышения точности и достоверности информации.

Разработанные модели и алгоритмы обеспечивают высокую степень автоматизации процессов навигации и управления БА [15–18]. Это позволяет минимизировать риски столкновений, обеспечить безопасное расхождение с другими судами и выполнить точное маневрирование в стесненных условиях. Особое внимание уделено учету гидрометеорологических условий, навигационных опасностей и интенсивного судоходства.

Дальнейшие исследования с учетом опубликованных ранее работ могут быть направлены, например, на совершенствование алгоритмов искусственного интеллекта для анализа навигационной обстановки и принятия решений в реальном времени. Также представляется перспективным внедрение дополнительных датчиков и систем, таких как лидары и оптические системы анализа окружающей обстановки для повышения надежности работы ССО [19–23].

БА, оснащенный современными системами навигации, ситуационной осведомленности и энергообеспечения, представляет собой перспективное решение для автоматизации портовых операций. Реализация рассмотренных систем в группе исследованных в настоящей работе устройств и систем позволит повысить эффективность и безопасность эксплуатации буксиров-автоматов в сложных условиях плавания [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на полезную модель № 222507 Российская Федерация, МПК В63В 3/00. Корпус судна-буксира / В. Г. Сенченко, А. Б. Крючков, В. В. Заслонов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова». — № заявл. 07.11.2023; опубл. 29.12.2023. — EDN TJCDAW.
2. Биденко С. И. О концептуальном облике буксира-автомата для работы в буксирном ордере или «стае» / С. И. Биденко, В. Г. Сенченко, А. Б. Васильев // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2021. — № 1–1. — С. 178. DOI: 10.52899/978-5-88303-611-7\_170. — EDN MQZWRV.
3. Биденко С. И. О концептуальном облике буксира-автомата для работы в буксирном ордере или «стае» / С. И. Биденко, В. Г. Сенченко, А. Б. Васильев // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2021. — № 1–1. — С. 34. — EDN NVQFVE.
4. Патент 2809129 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04, G05D 1/08, G08G 3/00. Способ проводки, швартовки и отшвартовки морского грузового судна в автономном режиме и способ работы цифровой

инструментальной платформы управления движением группы автономных судов-буксиров в портовой акватории / В. Г. Сенченко, М. А. Лопатин, Д. Е. Студеникин; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова». — № 2023102499 заявл. 03.02.2023; опубл. 07.12.2023. — EDN IEUNZK.

5. Епихин А. И. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А. И. Епихин, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 3–1(53). — С. 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010. — EDN IKWJXK.

6. Студеникин Д. Е. Динамическое формирование коридора безопасности при планировании маршрута движения судна / Д. Е. Студеникин, С. И. Кондратьев, Е. В. Хекерт, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2–4(52). — С. 128–131. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.081. — EDN RQCPHO.

7. Лопатина В. В. Методика проведения измерений геометрических перемещений подвижного объекта / В. В. Лопатина, В. Г. Сенченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–4(50). — С. 62–66. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.098. — EDN JCWMXP.

8. Заслонов В. В. Метод группового движения морских подвижных объектов / В. В. Заслонов, С. Н. Стуконог // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 2(111). — С. 76–84. DOI: 10.34046/aumsuomt111/13. — EDN OVAQNS.

9. Zaslono V. V. Description of Sea Maneuvers Performed by a Group of Automatic Tugs Using the Flock Method / V. V. Zaslono, V. G. Senchenko, A. A. Butsanets // Transportation Research Procedia. — 2022. — Vol. 61. — Pp. 347–353. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.056. — EDN LNPZXM.

10. Дергилев В. А. Реализация магистральных решений задач оптимизации управления судном на курсе в режиме автономного плавания / В. А. Дергилев, С. С. Жук // Транспортное дело России. — 2022. — № 4. — С. 149–153. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_4\_149. — EDN DMVAXQ.

11. Gaythwaite J. W. Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels / J. W. Gaythwaite. — Reston: ASCE Press, 2004. — 564 p.

12. Burylin I. V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes / I. V. Burylin // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2061. — Is. 1. — Pp. 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012074. — EDN FWSZAF.

13. Ключев В. В. Участие Российской Федерации в разработке международных правовых инструментов в области автономного судоходства / В. В. Ключев, С. Д. Айзинов, Ю. С. Меленас [и др.] // Транспортное право и безопасность. — 2024. — № S1. — С. 9–267. — EDN NVFQUQ.

14. Головина А. А. Некоторые проблемы квалификации неокказания капитаном судна помощи, терпящим бедствие на море в условиях автономного судоходства / А. А. Головина, С. Я. Пензев, Л. Г. Бакулина // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2023. — № 1(42). — С. 107–111. — EDN YELOOO.

15. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel / A. Golovina // SHS Web Conf. — 2022. — Vol. 134. — Pp. 00114. DOI: 10.1051/shsconf/202213400114. — EDN WPEUCZ.

16. Бурылин Я. В. Комплекс программно-аппаратных средств для решения задач автономного судоходства / Я. В. Бурылин, А. В. Гринек, И. П. Бойчук [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 4–1(58). — С. 68–74. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.025. — EDN VBEWWG.

17. Буцанец А. А. Исследование проблемы построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов через судоходные шлюзы / А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, Т. А. Волкова // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129. — EDN OQMZNO.

18. Karetnikov V. Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. — Springer Nature Singapore, 2021. — С. 40–46. — EDN PHCRQD.

19. Каретников В. В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15. — EDN KFIHYI.

20. Karetnikov V. Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020 — Springer Nature Singapore, 2021. — С. 146–156. — EDN JJVLQH.

21. Айзинов С. Д. Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С. Д. Айзинов, А. А. Буцанец, С. В. Смоленцев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83–96. — EDN HNHFAA.

22. Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6(34). — С. 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28. — EDN VCKKXN.

23. Мосейко Е. С. Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Ю. Рудь // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783. — EDN FFKEEK.

## REFERENCES

1. Senchenko, V. G., A. B. Kryuchkov and V. V. Zaslono. RU 222 507 U1, B 63 B 3/00. Korpus sudnabuksira. Russian Federation, assignee. Publ. December 29, 2023.

2. Bidenko, S. I., V. G. Senchenko and A. B. Vasil'ev. "O About the conceptual appearance of the automatic tow for work in a towing order or "pack"." *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta* 1–1 (2021): 178–178. DOI: 10.52899/978-5-88303-611-7\_170.

3. Bidenko, S. I., V. G. Senchenko and A. B. Vasil'ev. "About the conceptual appearance of the automatic tow for work in a towing order or "pack". " *Week of Science of St. Petersburg State Maritime Technical University* 1–1 (2022): 34.

4. Moseyko, E. S., E. O. Ol'khovik and V. Yu. Rud'. "Method of guiding, mooring and unmooring sea cargo vessel in autonomous mode and method of operating digital instrumental platform for motion control of group of autonomous towing vessels in port water area." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

5. Epikhin, A. I. and M. A. Modina. "Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses." *Morskije intellektual'nye tekhnologii* 3–1(53) (2021): 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010.

6. Studenikin, D. E., S. I. Kondrat'ev, E. V. Khekert and M. A. Modina. "Dynamic formation of a safety corridor during preliminary vessel route planning." *Morskije intellektual'nye tekhnologii* 2–4(52) (2021): 128–131. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.081.

7. Lopatina, V. V. and V. G. Senchenko. "Methodic of measuring of geometric displacements of a moving object." *Morskije intellektual'nye tekhnologii* 4–4(50) (2020): 62–66. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.098.

8. Zaslono, V. V. and S. N. Stukonog. "The method of group movement of marine mobile objects." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(111) (2024): 76–84. DOI: 10.34046/aumsuomt111/13.

9. Zaslono, V. V., V. G. Senchenko and A. A. Butsanets. "Description of Sea Maneuvers Performed by a Group of Automatic Tugs Using the Flock Method." *Transportation Research Procedia* 61 (2022): 347–353. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.056.

10. Dergilev, V. A. and S. S. Zhuk. "Implementation of trunk solutions to the problems of optimizing the management of the vessel on the course in the mode of autonomous navigation." *Transport Business Of Russia* 4 (2022): 149–153. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_4\_149.

11. Gaythwaite J. W. *Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels*. Reston: ASCE Press, 2004.

12. Burylin, I. V. "Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes." *Journal of Physics: Conference Series* 2061.1 (2021): 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012074.

13. Klyuev, V. V. et al. "Participation of the russian federation in the development of international legal instruments in the autonomous shipping." *Transportnoe pravo i bezopasnost'* S1 (2024): 9–267.

14. Golovina, A. A., S. Ya. Penzev and L. G. Bakulina. "Some problem aspects of qualification of the ship's captain's fail to render assistance to persons in distress at sea under the conditions of autonomous navigation." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 1(42) (2023): 107–111.



15. Golovina, A. "On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel." *SHS Web Conf.* 134 (2022): 00114. DOI: 10.1051/shsconf/202213400114.
16. Burylin, Ya. V. et al. "Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 4–1(58) (2022): 68–74. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.025.
17. Butsanets, A. A., N. M. Ksenofontov and T. A. Volkova. "Studying the problem of constructing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels through shipping locks." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.
18. Karetnikov, V., E. Ol'khovik, A. Butsanets and A. Ivanova. "Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020* Springer Nature Singapore, 2021: 40–46.
19. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh and A. A. Butsanets. "On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.
20. Karetnikov, V., E. Ol'khovik, A. Butsanets and A. Ivanova. "Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator." *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020* Springer Nature Singapore, 2021: 146–156.
21. Ayzinov, S. D. et al. "Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 74 (2024): 83–96.
22. Smolentsev, S. V. "The problem of estimation of navigation situation in the sea." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
23. Moseyko, E. S., E. O. Ol'khovik and V. Yu. Rud'. "A multi-level system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Заслонов Владимир Валерьевич** —  
 мл. научный сотрудник научно-исследовательской  
 лаборатории «Автоматизация судовождения»  
 ФГБОУ ВО «Государственный морской  
 университет имени адм. Ф. Ф. Ушакова»,  
 353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,  
 пр. Ленина, 93,  
 e-mail: [djdf3d@yandex.ru](mailto:djdf3d@yandex.ru)

**Жук Сергей Сергеевич** —  
 мл. научный сотрудник научно-исследовательской  
 лаборатории «Автоматизация судовождения»  
 ФГБОУ ВО «Государственный морской  
 университет имени адм. Ф. Ф. Ушакова»,  
 353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,  
 пр. Ленина, 93,  
 e-mail: [serzh.zhuk.99@mail.ru](mailto:serzh.zhuk.99@mail.ru)

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zaslonov, Vladimir V.** —  
 researcher of the research laboratory  
 "Automation of Navigation",  
 Admiral Ushakov  
 State Maritime University  
 93, Lenin's avenue, Novorossisk, 353924,  
 Russian Federation  
 e-mail: [djdf3d@yandex.ru](mailto:djdf3d@yandex.ru)

**Zhuk, Sergei S.** —  
 researcher of the research laboratory  
 "Automation of Navigation"  
 Admiral Ushakov  
 State Maritime University  
 93, Lenin's avenue, Novorossisk, 353924,  
 Russian Federation  
 e-mail: [serzh.zhuk.99@mail.ru](mailto:serzh.zhuk.99@mail.ru)

**Ol'khovik, Evgeniy O.** —  
 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: [olhovikeo@gumrf.ru](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию: 11 июня 2025 г.  
 Received: June 11, 2025.



## RESEARCH OF THE DIFFERENTIAL PROPERTIES OF THE NAVIGATIONAL ISOSURFACE

**I. V. Yuyukin**

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

*The topic of this paper is a qualitative study of navigational isosurfaces to establish the practicality of polynomial approximation for a class of differentiable functions with minimized “smoothness.” When solving problems of restoring the scalar field of navigation parameters, it is certainly important to form an initial correct judgment about the isogeometric proximity between the approximate and approximating functions, provided specific information is given about the differential properties of the synthesized navigation isosurface. It is assumed that the structure of the graphical model of the object under study and the characteristics of function approximation theory should be consistent with each other when forming a unified information approach. As a concrete illustrative example, a study of the differential properties of a formalized representation of an astronavigational isosurface — with geometric interpretation in the form of computer screenshots obtained as a result of the work of a compiled software module — has been performed. An assumption is made regarding the realistic possibility of choosing the optimal approximate navigation function based on visualization of the “smoothness” of a navigation function of any dimension in accordance with Schoenberg’s hypothesis about the relationship between minimum curvature and maximum smoothness of an algebraic line. The search for a solution to the problem of graphical transformation of break points of an abstract isoline, formalized in strict mathematical terms as a special case of a navigational isosurface, is determined. The developed methodology is proposed for effective verification of the reliability of big geospatial data. The prospective importance of proper mathematical processing of marine spatial data from geographic information systems is emphasized as a priority in providing consumers with reliable information for practical purposes. The relevance of the need to conduct a qualitative study of navigational isosurfaces to successfully approximate them from the unified standpoint of spline function theory coincides with the prediction of the emergence of complex hypothetical isolines, which are expected to be studied during the evolution of technical means of navigation.*

*Key words: qualitative research, differential properties of the isosurface, approximate navigation function, astronavigational isosurface, Schoenberg’s hypothesis, big geospatial data, geographic information system.*

**For citation:**

Yuyukin, Igor V. “Research of the differential properties of the navigational isosurface.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 515–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-515-533.

**УДК 656.61.052**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАВИГАЦИОННОЙ ИЗОПОВЕРХНОСТИ

**И. В. Ююкин**

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

*Темой работы является качественное исследование навигационных изоповерхностей с целью установления практической полиномиальной аппроксимация для класса дифференцируемых функций с минимизированной «гладкостью». При решении задач восстановления скалярного поля навигационных параметров представляется, безусловно, важным формирование изначального правильного суждения об изогометрической близости приближаемой и приближающих функций при условии предоставления конкретных сведений о дифференциальных свойствах синтезируемой навигационной изоповерхности. Предполагается, что структура графической модели объекта исследования и характеристики теории приближения функций должны быть согласованы между собой при формировании единого информационного подхода. В качестве конкретного показательного примера выполнено исследование дифференциальных свойств*

формализованного представления астронавигационной изоповерхности с геометрической интерпретацией в виде компьютерных скриншотов как результат работы составленного программного модуля. Выдвигается предположение о реалистичной возможности выбора оптимальной аппроксимативной навигационной функции на основе визуализации «гладкости» навигационной функции любой размерности в соответствии с гипотезой Шёнберга о взаимосвязи минимума кривизны с максимумом плавности алгебраической линии. Определен поиск решения неформализуемой в строгом математическом соответствии задачи графической трансформации точек разрыва абстрактной изолинии как частного случая навигационной изоповерхности. Предлагается использование разработанной методики в качестве эффективной проверки достоверности больших геопространственных данных. Акцентируется перспективная важность надлежащей математической обработки морских пространственных данных географических информационных систем в качестве приоритета предоставления потребителям обоснованной информации для практических целей. Актуальность необходимости проведения качественного исследования навигационных изоповерхностей с целью их последующей успешной аппроксимации с единых позиций теории сплайн-функций согласуется с прогнозированием появления сложных гипотетических изолиний, которые в перспективе предполагается изучать в процессе эволюции технических средств судовождения.

**Ключевые слова:** качественное исследование, дифференциальные свойства изоповерхности, аппроксимативная навигационная функция, астронавигационная изоповерхность, гипотеза Шёнберга, большие геопространственные данные, географическая информационная система.

**Для цитирования:**

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

### **Введение (Introduction)**

Для обеспечения успешности применения алгоритмов сплайн-аппроксимации с целью моделирования навигационных изоповерхностей необходимо предварительно провести качественное исследование на «гладкость» поверхностей равных значений поля навигационных параметров. Данный вариационный подход позволит синтезировать математически формализованную изоповерхность с определенными дифференциальными свойствами. Изоповерхность при данном подходе рассматривается как геометрическое представление скалярного поля результатов измерений навигационных параметров. Массиву дискретных измерений в пространстве соответствует определенная поверхность положения, интерпретируемая как изоповерхность. Практическая задача построения по дискретным данным кривых и поверхностей сложной формы с сохранением выделенных геометрических характеристик исходных измерительных данных понимается как проблема изогометрической аппроксимации<sup>1</sup>. Комплексное синтезирование кривых и поверхностей по дискретным данным предполагает обоснованное применение сплайновых методов с сохранением геометрических свойств исходных данных [1]. Апробированность математических моделей позволяет выполнить достаточно полное решение задачи изогометрической аппроксимации для произвольных сеточных данных.

В рамках данного подхода навигационные изолинии рассматриваются как графические контурные линии уровня навигационной изоповерхности при реализации проекционных сечений. Геометрически навигационные изолинии представляют собой следы сечения профиля изоповерхности горизонтальными плоскостями, находящимися одна за другой на заданных расстояниях. Значение приобретают подходы исследования дифференциальных свойств изоповерхности по изолиниям с восстановлением методами сплайн-функций информации, заложенной в структуре изолиний в виде отдельных геометрических объектов. Таким образом, об изогометрических свойствах визуально гладкой поверхности можно судить по анализу качественных свойств геометрии серии компонентных результирующих кривых линий, конструктивно формирующих данную поверхность графически в дискретном контексте [2]. Декомпозиционный способ кинематического задания аппроксимативной изоповерхности можно абстрактно представить как результат траассировочного движения одной сплайновой навигационной изолинии параллельно самой себе

<sup>1</sup> Квасов Б. И. Методы изогометрической аппроксимации сплайнами. М.: Физматлит, 2006. 360 с.

в трехмерном евклидовом пространстве с целью достижения эстетичности обобщенной формы геометрического объекта. Поэтому плоская электронная карта изолиний является одним из основных способов компьютерной визуализации двумерных скалярных полей данных. В общем случае навигационное пространство понимается трехмерным, и изоповерхность при этом играет лидирующую роль как геометрический образ согласованной концентрации навигационных изолиний. Навигационную изоповерхность с выбранными геометрическими свойствами можно трактовать как результирующую поверхность равных значений навигационных параметров в объеме евклидова навигационного пространства [3].

Обоснованием необходимости проведения исследования дифференциальных свойств навигационной изоповерхности является гипотеза большей вероятности реализации уточненного представления навигационной функции с лучшими дифференциальными свойствами для получения качественного результата финального приближения<sup>2</sup>. Главная идея состоит в формировании изначального правильного суждения о математической близости геометрии приближаемой и приближающих функций при возможности исследовательского предоставления конкретных сведений о дифференциальных свойствах аппроксимируемой навигационной функции.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Обосновать необходимость предварительного качественного исследования навигационной изоповерхности с целью обеспечения обоснованной гарантии успешного применения алгоритмов сплайн-аппроксимации.
2. Апробировать методику исследования астронавигационной изоповерхности на дифференцируемость на конкретном примере использования формулы счислимой высоты светила.
3. Рассмотреть вариативность практической применимости разработанного метода качественного исследования навигационной изоповерхности.
4. Разработать пакет прикладного программного обеспечения качественного исследования навигационной изоповерхности на языке программирования высокого уровня.
5. Объяснить теоретическую возможность практического применения методики качественного исследования перспективных инновационных изоповерхностей в целях технологического развития судоководения.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Ориентированная на многомерные задачи полиномиальная аппроксимация непрактична для класса дифференцируемых функций с малой гладкостью [4]. Вследствие данного факта объективно создается обязательное условие необходимости качественного характера исследования изоповерхности как композиции гильбертова пространства в вариационном сплайновом подходе с целью обоснованной постановки задачи построения оптимальной интерполяционной формулы любого функционала. Структура математической модели объекта исследования и характеристики теории приближения функций должны быть изометрически согласованы между собой и составлять единую информационную технологию при назначении фрагментарных областей аппроксимации в пространствах аргументов для оптимального выбора и выполнения аппроксимации [5].

Теоретическое исследование дифференциальных свойств предлагается апробировать на конкретном примере вычисления астронавигационного параметра высоты светила. Функциональная связь между высотой светила  $h$  и исходными данными о его положении на небесной сфере в виде известных его эфемерид склонения  $\delta$  и местного часового угла  $t_m$ , а также координат зенита наблюдателя выражается традиционной формулой мореходной астрономии в классическом представлении<sup>3</sup>:

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t_m), \quad (1)$$

где  $h$  — высота светила;

<sup>2</sup> Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.

<sup>3</sup> Хлюстин Б. П. Мореходная астрономия. М. – Л.: ВМИ НКВМФ, 1939. 379 с.

$\varphi$  — географическая широта;  
 $\delta$  — склонение светила как атрибут экваториальных систем координат;  
 $t_m$  — местный часовой угол в практическом счете.

Как известно, местный часовой угол элементарно вычисляется по стандартной математической зависимости посредством использования гринвичского часового угла:

$$t_m = t_{гр} \pm \lambda_w^E, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — географическая долгота восточного или западного наименования;

$t_{гр}$  — часовой угол на нулевом меридиане Гринвича.

Формула (1) расчета высоты светила в геометрическом представлении интерпретируется как четвертое измерение изогеометрической функциональной зависимости от трех функциональных аргументов:  $\varphi$ ,  $\delta$ ,  $t_m$ . Предлагаемое исследование дифференциальных свойств астронавигационной изоповерхности не имеет аналогов в привычном навигационном понимании.

С целью организации изолинейного плавания [6] из формулы (1) можно получить модифицированное уравнение изолинии высоты светила в текущих координатах  $\varphi$  и  $\lambda$  как координат геометрических точек круга равных высот:

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t_{гр} \pm \lambda_w^E). \quad (3)$$

В процессе анализа формулы (3) можно сделать вывод о том, что величины  $h$ ,  $\delta$ ,  $t_{гр}$  остаются постоянными, поскольку являются фактическими параметрами круга равных высот конкретного светила, а меняются только координаты  $\varphi$  и  $\lambda$  точек изолинии высоты светила. При определенных эфемеридах светила и известной его высоте, задаваясь значениями широты, можно фактически вычислять соответствующие координаты долготы на сфере по трансформированной из уравнения (3) конечной формулы вычисления долготы судна по известной широте:

$$t_{гр} \pm \lambda_w^E = \arccos \left[ \frac{\sin(h) - \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta)} \right]. \quad (4)$$

Таким образом, на основе использования формулы (4) от любого судового времени можно перейти к гринвичскому времени с параллельным получением эфемерид светила:  $t_{гр}$ ,  $\delta$  и учитывая постоянство высоты светила на конкретный момент времени по результатам расчета географических долгот в зависимости от заданных с фиксированным шагом географических широт, становится практически возможно нанести на сфере как модели Земли изолинию круга равных высот в качестве графического фактора практической организации изолинейного плавания.

Для проекционного представления четырехмерного изображения (1) предлагается последовательно применять *метод сечения параллельными плоскостями* для детализации дифференциальных свойств астронавигационной изоповерхности. Вычисление мгновенных значений счислимой высоты светила с целью их графической визуализации на дисплее компьютера осуществляется при двух комбинаторных аргументах, заданных временно константами, по оси значений третьего вариативного аргумента с установленным равномерным шагом в диапазоне от минимального до максимального значения в известных в мореходной астрономии пределах величин:

$$\varphi \in [-90^\circ; +90^\circ]; \quad \delta \in [-90^\circ; +90^\circ]; \quad t \in [-180^\circ; +180^\circ]. \quad (5)$$

В классической аналитической зависимости для каждого значения аргумента существует значение функции, поэтому явная формализация не может представлять многозначную кривую. Данное ограничение можно компенсировать, используя неявное задание функции. Геометрическое представление классического уравнения (1) в неявной форме формализует астронавигационную изоповерхность в общем виде как математическую формализацию четырехмерной размерности:

$$F(\varphi, \delta, t, h) = 0. \quad (6)$$

Эффект, полученный за счет совершенствования численных методов, сравним с эффектом, достигаемым за счет повышения производительности компьютера. Оценка оптимальности от при-



менения новых численных методов при решении прикладных естественно-научных задач сводится к 40 % общего эффекта, достигаемого за счет применения новой вычислительной техники<sup>4</sup>.

Задача численного дифференцирования в пространстве непрерывных функций в строгом математическом понимании является некорректно поставленной при попытке прямого аналитического решения ввиду отсутствия непрерывной строгой зависимости от начальных данных, задача считается корректной, если ее решение существует, а также единственно и непрерывно зависит от входных данных<sup>5</sup>. Кроме того, следует отметить, что традиционно значения заданной навигационной функции являются неточными, что весьма существенно сказывается на результате решения некорректно поставленной задачи и усложняет ее решение. Как следствие, единственным практическим способом получения первоначального представления о дифференциальных свойствах аппроксимируемой навигационной функции является предлагаемый подход качественного исследования визуально гладкой изоповерхности на дифференцируемость.

### Результаты (Results)

Средствами компьютерной графики на основе разработанного алгоритма выполняется геометрическая интерпретация поверхностных дифференциальных свойств уравнения счислимой высоты светила (1). Результатом работы разработанного программного модуля является получение последовательных проекций четырехмерного объекта, определяемого в неявном виде выражением (6). Необходимость проецирования уравнения (1) по фиксированным плоскостям обусловлена тем, что наглядное графическое представление уравнения счислимой высоты светила (3) в декартовых координатах невозможно для функции, состоящей более чем из двух переменных<sup>6</sup>. В трехмерном пространстве практически реализуемо в наглядной форме только графическое изображение функции двух переменных, как и для функции одной переменной.

В явной форме записи непосредственный расчет высоты светила формализуется из уравнения (3) как функции трех действительных аргументов традиционным способом:

$$h = \arcsin \left[ \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t_{\text{г}} \pm \lambda_{\text{w}}^{\text{E}}) \right]. \quad (7)$$

При задании тридцати узловых равномерных точек по каждой из координатных осей  $\varphi$ ,  $\delta$  и  $t$  значения переменной высоты светила вычислялось 27000 раз в процессе вычислительного эксперимента. Идея геометрической интерпретации предлагаемой методики качественного исследования основана на парадигме *линий уровня*. На изоповерхности навигационная функция имеет постоянное значение. В плоскостном случае под точечным множеством одинаковых значений навигационных параметров понимается линия уровня как аналог изолинии в судовождении. В терминологии линий уровня подразумеваются проекции на *картинную плоскость* как следы пересечения графика многомерной навигационной функции с серией секущих параллельных фиксированных плоскостей, что, фактически, было выполнено в рамках проведенного вычислительного эксперимента.

Плоскостные изображения на компьютерном дисплее получаются при визуализации расчетов значений счислимой высоты, с геометрической точки зрения являющихся фиксациями точек четырехмерной фигуры по линиям уровня, проецируемых по параллельным плоскостям на картинную плоскость с заданным равномерным шагом по каждой из координатных осей. Следы линий уровня образуются в результате проецирования на картинные плоскости поверхностей уровня при равных диапазонных значениях навигационной функции высоты светила, представляющими по факту сечения четырехмерной изогеометрической формы в формализации (1) с равномерным интервалом по шагу вычислений  $h$  по одной из координатных осей, когда двум другим аргу-

<sup>4</sup> Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы [Электронный ресурс]. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 639 с.

<sup>5</sup> Квасов Б. И. Численные методы анализа и линейной алгебры: учеб. пособие. Новосибирск: НГУ, 2012. 262 с.

<sup>6</sup> Бронштейн И.Н, Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.



ментам на двух других осях эпизодически присвоены постоянные значения. Средствами компьютерной графики визуализируется подход качественного исследования на гладкость четырехмерного объекта изогеометрии на примере проецирования поверхностей уровня на картинную плоскость трехмерного евклидова пространства. Представленный рис. 1 является скриншотом с компьютерного дисплея как результат работы программы качественного исследования дифференцируемости астронавигационной изоповерхности.

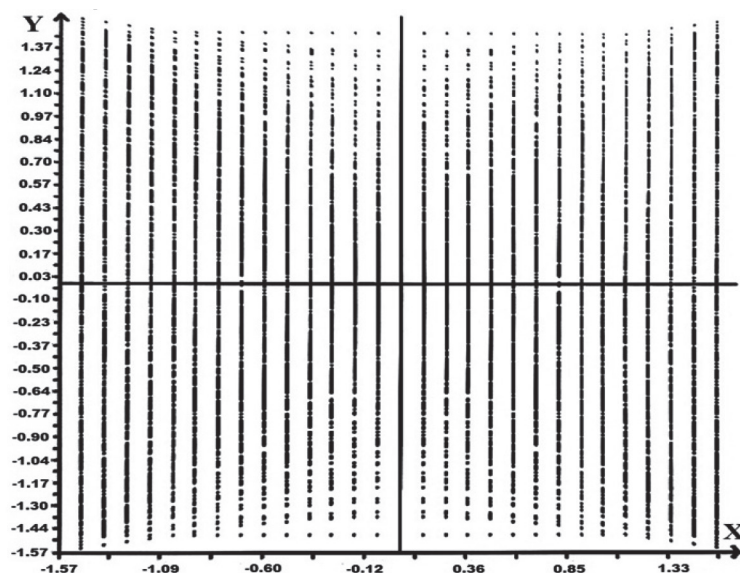


Рис. 1. Скриншот проекции регенерации изображения дифференциальных свойств астронавигационной изоповерхности

Представленный на рис. 1 скриншот является одним из вариантов многочисленных композиций проведенного качественного исследования астронавигационной изоповерхности. Анализ данного рисунка позволяет понять суть методики исследования дифференциальных свойств фигуры любой размерности при геометрическом построении сегментов контуров многомерной формы [7]. Каждое рассчитанное значение высоты светила фиксировалось визуализированной точкой на компьютерном экране в геометрической системе координат  $XOY$ . По оси абсцисс  $X$  откладывались значения широты, по оси ординат  $Y$  — высоты светила в соответствии с условиями (5) как одного из вариантов проекционного проектирования. Необходимо также отметить, что выражения (5) приведены в градусной мере, а на скриншоте применяется радианная мера. С целью ориентировки приводится замечание о соответствии градусной и радианной меры:  $90^\circ = 1,57$  рад, а, следовательно,  $180^\circ = 3,14$  рад.

На основе изучения скриншота сделан вывод о том, что при проведении вычислительного эксперимента использовалось в каждом случае 30 параллельных проекционных сечений. Так как в соответствии с разработанной методикой организация вычислений формировалась по линиям уровня, визуализация вычисленных значений счислимой высоты при их точечной прорисовке отразилась непосредственно в трассированных следах линий уровня на дисплее компьютера. В вычислительном эксперименте количество прорисованных точек и частота их расположения по каждой линии уровня определяется кривизной четырехмерной фигуры (6). Визуализированные на экране точки предоставляют базовую информацию о дифференциальных свойствах астронавигационной изоповерхности, поскольку они являются элементарными точечными растрами, из которых блочным образом формируется графическая база данных вариативного комплекса результатов расчетов высоты светила. Конечное множество прорисованных устойчивых периодических точек формирует фиксированное отображение подтвержденного гладкого многообразия геометрической формы в рамках практической реализации концепции диффеоморфизма многомерного пространства в зеркальном отображении [8].

Последовательность точек, каждая из которых характеризуется значениями выбранной системы координат, может быть представлена в двоичной системе как числовая матрица. Растровая графика представляет собой определенный набор пикселей, каждый из которых является отдельным компонентом визуализированной информации с выбранным тональным цветом и яркостью в определенной композиции компьютерной мозаики в двоичном коде. Пиксели фиксированного размера сгруппированы по матричному подобию в строки и столбцы, что соответствует битовой карте максимального разрешения дисплея. Зрение наблюдателя воспринимает объединенную совокупность пикселей на экране как изображение непрерывной линии в мелком масштабе. Одной из наиболее распространенных проблем растровой графики является ее ступенчатая визуализация, так как при увеличении масштаба возникает «лестничный эффект», под которым подразумевается распадение изображения непрерывной линии на отдельные сдвинутые между собой пиксели. Причина ступенчатого геометрического феномена объясняется сдвигом яркостных точек на экране компьютера, что приводит к мозаичному изображению с нечеткой различимостью отдельных деталей. При обычном скроллинге у растровых компонент линии увеличивается размер каждого пикселя при искусственном максимально крупном масштабе, и тем самым искажается оптическая иллюзия целостности электронных изобразительных линий ввиду потери определенных пикселей при синхронном дефекте имитации построения гладких алгебраических линий.

Фиксацией положения последовательности точек можно управлять с помощью *матричного преобразования*. Если точки располагаются на достаточно близких расстояниях, то при их визуализации будет создаваться впечатление, что наблюдается непрерывная линия (см. рис. 1). Как известно, плоская кривая может быть представлена совокупностью точек при условии их близкого расположения друг к другу. С математической точки зрения определение кривой по известному расположению ряда точек представляет решение задачи интерполяции. Например, с помощью полиномиальной интерполяции можно обеспечить прохождение кривой через известные точечные координаты. Для этого требуется определение коэффициентов полинома определенной степени. Реалистичная форма кривой линии, зафиксированной между заданными точками, зависит от порядка полинома и от граничных условий. Можно использовать также задачу аппроксимации, когда значения контрольных точек заданы с некоторой конечной точностью и необходимо определить оптимальную кривую, лучшим образом описывающую тенденцию представления геометрических данных. В вариативном контексте кривая может проходить только через некоторые из заданных точек, но может и не проходить ни через одну из них. Подобная задача сглаживания эмпирических данных возникает в случае, когда необходимо определить изогеометрию линии на основании результатов приблизительных измерений. Аппроксимирующая кривая формализует оценочные значения числовых данных на рассматриваемом диапазоне аргументации функции. Когда заданные точки содержат существенную неопределенность, применяют *метод наименьших квадратов*, минимизирующий сумму квадратов отклонений между фактическими и оцениваемыми навигационными параметрами при априорном или апостериорном способе<sup>7</sup>. Вследствие указанных фактов предварительное исследование дифференциальных свойств навигационной изоповерхности имеет принципиально важное значение для последующего правильного выбора интерполянта или аппроксиманта любой навигационной функции.

Принцип построения электронных изолиний состоит в том, как используются гридированные данные в координатной сетке с полученными эмпирическим способом значениями в каждой ячейке, визуализируемыми на компьютерном дисплее в виде изолинии. Дополнительно подлежит определению, между какими из сеточных ячеек изолиния проходит посредством определения точек на сторонах координатной ячейки, в которых значение функционала равно значению изолинии. Данные точки находятся при помощи интерполяции или аппроксимации, а при необходимости используется *процедура сглаживания*. В целом необходимо отметить, что для определения

<sup>7</sup> Ююкин И. В. Расчет вероятнейших координат местоположения судна с использованием матричного исчисления: учеб. пособие. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2024. 124 с.

координаты каждой точки, принадлежащей изолинии, необходимо предварительно воспользоваться непрерывностью рассматриваемой функции с целью заблаговременного исключения *эффекта самопересечений изолинии* [9]. В финале визуализации через определенные изогометрические точки проводится непрерывный контур на основе сплайнового детерминированного метода в оптимальном варианте.

При компьютерной визуализации изолиний на четкость воспроизведения изображения оказывают влияние числовые различия между соседними ячейками сетки как масштабированными растровыми аналогами кластеров геометрических точек. Ввиду различий в расстояниях между соседними доменами в географическом пространстве числовые различия не могут точно отражать тенденции изменения особенностей дискретизации изолиний [10]. Следствием этого является частичная потеря дифференциации визуализированных данных в зависимости от их неопределенности. Отличительной особенностью навигационной изоповерхности является то, что горизонтальная и вертикальная координатная неопределенности для каждого экспериментального зондирования используются для создания сетки усредненных значений результатов измерений. По сути, компьютерный подход к проблеме генерации и обобщения комплекса изолиний из необработанных входных точек с позиций понятия *навигационной изоповерхности* основан на непрерывной интерполяции плоскометрических точек данных для наглядной визуализации изображения. При игнорировании растеризации сохраняются позиции всех входных точек в их точных контурных координатах в процессе математической обработки, что с точки зрения геометрической реализации априорно формирует кусочно-линейную поверхность как комплекс *линий уровня* в качестве аналогии изолиний.

Эффективный координатный набор гридированных узлов выполняет роль кусочно-алгоритмической основы для сплайнового синтезирования изоповерхности с целью *правдоподобной визуализации трехмерного отображения* [11]. Эффективное формирование шага триангуляции поверхности гридированных данных может позволить последовательно и корректно отображать числовые различия между соседними доменами каркасной сетки, что создает прецедент улучшения возможностей компьютерной визуализации [12]. Гридированные данные при этом интерпретируются как зафиксированные результаты измерений с формализованным представлением двумерной сетки для представления аппроксимативной изоповерхности в трехмерном пространстве. В местах стыковки сеточных парселей возможно несоответствие реальным данным. В то же время с улучшением качества компьютерного построения навигационной изоповерхности может в допустимых пределах ухудшаться скорость визуализации за счет алгоритмической необходимости воспроизведения более крупных патчей моделируемого каркаса 3D формата. Цифровую модель на основе гридированных данных с математической точки зрения можно характеризовать в конечном виде как классическую блочную матрицу, каждый элемент которой задействуется при визуализации изображения для каждого отдельного пикселя электронной изолинии как единичного атрибута навигационной изоповерхности. Точечные измерения, ориентировочно представляющие фиксированный элемент пространства, должны хорошо соотноситься с компьютерными пикселями как элементарными ячейками гридированной сетки при визуализации объектных атрибутов [13]. Область визуального восприятия информации также должна обладать высокой степенью пространственной однородности в пикселях для обеспечения *эффекта растеризации*. Игнорирование учета данной проблемы приводит к феномену несоответствия гридированных и визуализированных данных, показательно проявляющемуся в виде так называемого *лестничного эффекта* при ускоренном масштабировании отображения дисплея на основе традиционного компьютерного скроллинга [14].

Анализ рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что на участках, где астронавигационная изоповерхность имеет фактическую кривизну, наблюдается четкая регенерация изображения проекций линий уровня благодаря часто расположенным визуализированным точкам, соответствующим фактическим вычислениям значений высоты любого небесного ориентира. На некоторых участках изоповерхности с минимальной кривизной наблюдаются разреженные прорисованные вычислительные точки, по сути, представляющие собой проекции условных искаженных изолиний.

Методика оперирования искаженными изолиниями апробирована на основе авторского прикладного программного обеспечения [15]. Из анализа геометрической интерпретации (см. рис. 1) можно сделать вывод об отсутствии обширных белых пятен относительно смежных точек, где бы наблюдались значительные пропуски точечных визуализаций, появление которых могло свидетельствовать об имеющих место фактических дифференциальных разрывах астронавигационной изоповерхности (1). Гипотетическое появление на рис. 1 протяженных пропусков точечных прорисовок по следам проекционных сечений может свидетельствовать о вероятности графических разрывов самой астронавигационной изоповерхности как геометрического объекта.

Таким образом, наглядное представление в проекциях по линиям уровня четырехмерного измерения (см. рис. 1) подтверждает отсутствие явных функциональных разрывов в исследуемом на дифференцирование уравнения (1) оригинальным способом. Полученная геометрическая интерпретация позволяет сделать заключение, что навигационная функция высоты светила практически не имеет графических разрывов и неопределенностей и является вследствие этого дифференцируемой с максимально допустимым дефектом непрерывности производной, обычно на единицу меньшим, чем степень сплайна. Допустимые дефекты гладкости сплайн-аппроксимации уже на предварительном этапе наблюдаются визуально самым наглядным образом при анализе скриншота проекции геометрической интерпретации дифференциальных свойств астронавигационной изоповерхности (см. рис. 1).

В результате проведенного качественного исследования астронавигационной изоповерхности получено экспериментальное подтверждение о правомерности применения методов сплайн-аппроксимаций к вычислительным реализациям счислимой высоты светила по формуле (1). Применимость математического аппарата кусочных аппроксимаций к любой математической формализации основывается на неперемennom условии дифференциальной гладкости функциональной зависимости. Проведенное качественное исследование навигационной функции счислимой высоты светила эмпирическим путем доказывает ее «гладкость» и, как следствие, возможности обоснованного применения сплайновой интерполяции или аппроксимации. Условная визуализация по линиям уровня протяженных четких белых пятен вычислительных реализаций опровергла бы саму возможность синтеза навигационной изоповерхности с позиций методов сплайн-функций. Внимательный анализ рис. 1 с геометрической точки зрения позволяет сделать прогностический вывод об гарантированной успешности применения кубических аппроксимантов к моделированию астронавигационной изоповерхности.

В процессе изучения проблемы точного приближения кривизны сложной изолинии допускается практическая возможность изгиба плоской кривой в физическом пространстве с возможностью существования ограниченного количества точек разрыва. Предусмотрительный учет рассматриваемого геометрического эффекта создает теоретическую предпосылку синтеза сложных навигационных изолиний. Вариации решения задачи сводятся к плановому подбору сплайновой модификации по степени «гладкости» на основе предварительной информации качественного исследования навигационной изоповерхности. С геометрической точки зрения кубический сплайн является наиболее предпочтительным формосохраняющим интерполянтom, поскольку он формирует пространственную «гладкую» кривую как фрагментарную часть изоповерхности [16]. При этом кубический сплайн понимается как кусочно-полиномиальная дважды непрерывно дифференцируемая функция однократного дефекта, составленная из фрагментов кубических многочленов.

При рассмотрении вопроса манипулирования формой восстанавливаемого кубическим сплайном математического объекта в парадигме изogeометрического анализа предполагается вероятность изгиба «гладкой» кривой с допустимым максимумом ситуации однократного разрыва производной функции [17]. Данный геометрический эффект ориентирует исследователя на теоретическую возможность синтеза сложных изолиний. Для получения оптимальной интерполяции с математической точки зрения выгодно использовать кусочные полиномы третьей степени. Фактически кубический сплайн задает своими конструктивными особенностями иде-



альный вариант приближения, так как применение сплайна меньшей степени автоматически приведет к возможности расходимости самого процесса интерполяции ввиду понижения «гладкости» алгебраической кривой.

Кубический сплайн имеет максимальный класс «гладкости», обеспечивающий наличие непрерывности вторых производных в серии точек «склейки» кусочной конструкции. Дифференцируемость до вторых производных в точках многозвенного соединения однозначно не создает «гладкости» кубического сплайна в смысле приближения минимума кривизны искусственно синтезируемой плоской кривой. Для того чтобы получить минимум кривизны или максимум «гладкости», в соответствии с *гипотезой Шёнберга* о взаимосвязи сплайнов [18], необходимо дополнительно обеспечить правильную ориентацию набора контрольных вершин характеристического многоугольника сплайнового базиса.

В случае получения положительного результата исследования дифференциальных свойств навигационной изоповерхности следует ожидать гарантированную точность сплайн-аппроксимации кубическими сплайнами  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  как погрешности навигационного параметра, полученную эмпирическим путем на основе авторского вычислительного эксперимента [19]. При решении уравнения высоты светила (1) *методом последовательной полиномиальной сплайн-интерполяции* следует ожидать увеличение быстродействия расчетов не менее 30 % по сравнению со стандартными компьютерными решениями с помощью разложения в ряд Тейлора, что практически обеспечивает возможность выполнения навигационных вычислений тригонометрических компонент в масштабе реального времени [20]. В доказательном примере определения повышения скорости вычислительных операций была использована формула (7), но фактически интерполировались только функции синуса и арксинуса, а значения косинуса рассчитывались по формулам приведения посредством использования интерполированных значений синуса. Данные получены по результатам авторских вычислительных экспериментов по результатам проверок на тестовых примерах. Время работы программно-реализованных алгоритмов замерялось в тысячных долях секунды с закликиванием на 100000 при решении одинаковых тестовых задач.

В настоящее время кубические сплайны являются важнейшим инструментом аппроксимации функций [21]. Хорошие дифференциальные свойства и алгоритмичность делают аппарат кубических сплайнов универсальным инновационным средством обработки разнообразной навигационной информации. Поэтому для получения эффективной аппроксимации и предлагается использовать кусочные полиномы третьей степени. Апробированный кубический сплайн имеет класс «гладкости»  $C^2$  при минимальном компактном носителе, что позволяет интерпретировать указанный математический феномен как *экстремальный сплайн* наивысшей «гладкости». Таким образом, кубический сплайн воспроизводит функциональную непрерывность до второго порядка в местах соединений кусочных полиномов, но однократный дефект во внутренних точках сегментных соединений непосредственно не гарантирует «гладкости» сплайна в контексте минимума кривизны вдоль изолинии на всем интервале построения. Для того чтобы получить минимум кривизны, а следовательно, и максимум «гладкости» должны быть минимизированы сплайновые коэффициенты для каждого сеточного отрезка за счет правильного выбора диапазона изменения математических параметров и специальных граничных условий для точного воспроизведения наклонов алгебраической кривой в концевых участках общего отрезка аргументации аппроксимации.

Свойство экстремальности позволяет практически решить важную задачу приближения сплайнами со «сглаживанием» исходных данных в ситуации, когда в измерениях присутствует ожидаемая погрешность. *Сглаживающий сплайн* характеризуется устойчивостью приближения к заданным исходным значениям в окрестности допустимых отклонений за счет применения «весовых» коэффициентов в отличие от интерполяционного сплайна, строго проходящего через все позиции измеренных данных. По сравнению с интерполяционным сплайном эволюция до сглаживающего сплайна требует большего объема вычислительных операций. При решении вопроса о том, какой сплайн синтезировать, необходимо в первую очередь учитывать погрешности информационных



данных, а также дифференциальные свойства моделируемого объекта. Практически бесполезным является применение сглаживающего сплайна, когда экспериментальная информация задана с точностью, сопоставимой с погрешностью представления чисел в двоичной системе счисления компьютерных вычислительных операций. Хорошие аппроксимативные свойства в сочетании с эффективностью компьютерных реализаций возводят кубические сплайны в ранг оптимального средства решения различных прикладных математических задач судовождения.

В результате проведенного специального исследования теоретической оптимальности аппроксиманта обоснованный выбор сделан на основе построения кубических функций [15]. Фактически кубический сплайн задает своими конструктивными особенностями идеальный вариант приближения, так как применение сплайна меньшей степени автоматически приведет к возможности расходимости самого процесса интерполяции ввиду понижения «гладкости» алгебраической кривой. Поскольку в качестве оптимального варианта в постановке задачи четкости визуализации синтезированного геометрического объекта требуется *дифференцируемая функция*, следует обратиться к кубическим сплайнам как чрезвычайно гибкой конструкции, позволяющей осуществить наилучшие математические приближения. Универсальным и удобным в вычислительном смысле оказывается применение *кусочно-кубических многочленов* для приближения плоских кривых и *кусочно-бикубических многочленов* для представления «гладких» поверхностей. При современном использовании компьютерных технологий появляется реальная возможность при решении разнообразных задач применять в математическом обеспечении кубические сплайновые конструкции для создания реалистичности проекционного изображения изометрической модели при обоснованной вычислительной устойчивости перспективных сплайновых алгоритмов.

Сплайн третьей степени как минимум один раз непрерывно дифференцируем по каждой из переменных, т. е. соседние позиционные сеточные ячейки как асимптотические четырехугольники, сегментным образом синтезирующие навигационную изоповерхность, гладко склеены между собой до непрерывности второй производной [22]. При этом изоповерхность распадается на конечное множество клеток с локальными кусочно-аналитическими описаниями. Фактор *кусочности* эффективным математическим образом формирует дифференциальные свойства синтезируемой навигационной изоповерхности. Под математической «гладкостью» традиционно подразумевается успешность функциональной дифференцируемости. Лидирующая роль сплайнов третьей степени однозначно проявляется при компьютерной визуализации программных алгоритмов удобочитаемостью графических визуализаций и практическим отсутствием графических искажений.

Предположим, что качественное исследование дифференциальных свойств навигационной функции выявило у абстрактной изолинии как частного случая навигационной изоповерхности графическую трансформацию с точками разрыва. Гипотетическая интерпретация вариативности предполагаемой ситуации смоделирована в виде рис. 2 абстрактным образом.

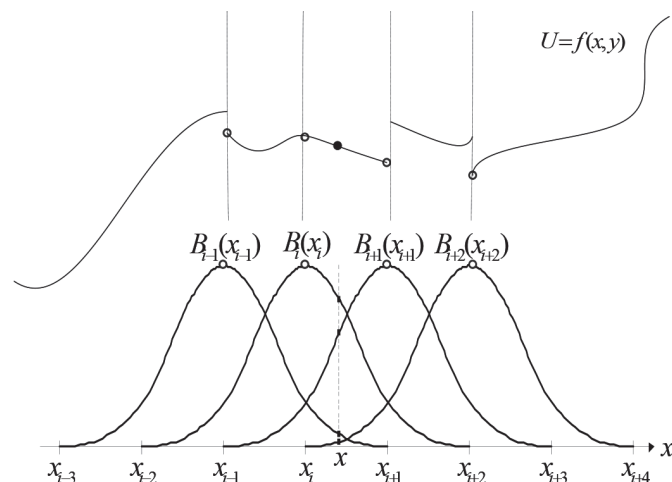


Рис. 2. Гипотетическая интерпретация аппроксимации кубическими сплайнами абстрактной искаженной изолинии

Имитированные точки функционального разрыва  $x_{i-1}$ ,  $x_{i+1}$ ,  $x_{i+2}$  на рис. 2 фактически фиксируются визуальным образом как отсутствие прорисовки на рис. 1 в разреженных локальных областях при качественном исследовании уравнения (1) на дифференцируемость. Предлагается пересмотреть стереотипное абстрагирование от геометрической интерпретации искаженной изолинии, поскольку методы сплайн-функций позволяют оперировать с такими сложными алгебраическими объектами, как разрывные изолинии, подобных геометрическому объекту, интерпретируемому на рис. 2. Относительная сложность представленной абстрактной изолинии обуславливается вариативным наличием существования трех внутренних точек разрыва в координатах  $x_{i-1}$ ,  $x_{i+1}$ ,  $x_{i+2}$  (см. рис. 2). Функциональные разрывы рассматриваются как предельные случаи математического искажения изолинии. В классической постановке вопроса в теории аппроксимации, считается, что во внутренних изолинейных точках разрыва навигационная функция  $U = f(x, y)$  условно не определена.

Фактически с позиций теории приближения функций кусочная функция  $S(x)$  имеет два значения в каждой позиции разрывности, а именно: функциональное значение слева определяется левым сплайновым многочленом, значение функции справа — правым многочленом. Для определенности предлагается выбирать в каждой точке разрыва значение справа, т. е. условно считать, что сплайн является *непрерывной экстраполированной функцией*, что дает определенную однозначность устойчивой программной реализации алгоритма. Для преобразования точки разрыва левый и правый многочлен виртуально «склеиваются» в один удлиненный правый с организацией унимодальной функции, уменьшающей вариацию. Таким образом, точка разрыва обладает свойством строгого альтернирования в смысле совпадения по значению с правым многочленом при абстрагировании от фактического существования функциональной неопределенности ввиду формального условия фактического «отсутствия узла» в точке разрыва.

Предположение о принципиальной возможности моделирования разрывной изолинии является авторской точкой зрения на перспективу аппроксимации искаженной навигационной изолинии кубическими сплайнами. С математической точки зрения при этом можно по-прежнему традиционно считать, что функция  $U = f(x, y)$  имеет два условных значения в каждой точке разрыва. Однако при кусочно-многочленной аппроксимации для кубического случая теоретически допускается ситуация разрыва одной производной при так называемом *существовании однократного дефекта сплайна*, что позволяет в данном случае игнорировать факт двойственности функциональных значений.

Как показано на рис. 2, для получения наибольших порядков приближения навигационной функции точки разрыва должны быть включены в число узлов координатной сетки независимым образом в качестве дополнительного условия. Если при восстановлении искаженной изолинии не позаботиться о целесообразности принятия таких специальных математических мер, то для кубического сплайна будет характерным появление флуктуирующих осцилляций. При оптимальном выборе серии узлов наличие разрыва практически не влияет на стратегическое поведение сплайновой конструкции в теоретическом точном понимании процесса аппроксимации.

Предлагаемый подход позволяет считать искаженную изолинию практически идентичной кусочно-многочленной функции с принципиально возможным применением к синтезированию разрывной изолинии в полной мере аппарата сплайн-функций. Благодаря данной точке зрения отпадает тактическая необходимость применения сложных рутинных математических процедур при анализе применимости кубического аппроксиматора в точке объективно оцениваемого формального разрыва. В соответствии с этим программная реализация разработанных алгоритмов практически не меняется по содержанию, за исключением добавления в цикл паскаль-программы эпизодического логического условия приравнивания в точке разрыва искаженной изолинии по функциональности значения справа. Таким образом, кубическая кусочно-многочленная функция в прикладной программе искусственно рассматривается как непрерывная функция справа, что фактически однозначно создает возможность использования в обработке навигационной информации искаженной изолинии как таковой.

Поскольку искаженная изолиния имеет фактологию сложной математической формализации, классическим путем решить навигационную задачу невозможно, в отличие от синтеза искаженных изолиний методами сплайн-интерполяции, который не представляет реальной математической проблемы с позиций аппарата кусочных аппроксимаций. Несмотря на алгоритмические затруднения обработки информации с учетом традиционного представления о математической неформализуемости разрывных в дифференциальном контексте изолиний, возможное решение проблемы разрывов изолиний при их визуализации уже существует [23]. Выполненное исследование может принципиально изменить сформировавшуюся позицию на основе возможности проведения качественного исследования астронавигационной изоповерхности на предварительном самой аппроксимации этапе. Изложенная гипотеза позволяет непосредственно использовать анализ дифференциальных свойств навигационной функции в обработке навигационной информации.

В рамках предлагаемой методики выдвигается точка зрения гипотетической возможности проведения качественного исследования на дифференцируемость многомерной навигационной изоповерхности любой размерности изогеометрии. При практическом использовании разработанной методики качественного исследования дифференциальных свойств приближаемой навигационной функции ее размерность фактически определяет только количество проекций по линиям уровня.

Предполагается использование разработанной методики совместно с подходом поиска ошибок измерений в скалярном поле навигационных параметров как реалистичную проверку достоверности больших геопространственных данных [24]. Самостоятельный интерес математических основ судовождения представляет дополнительная возможность использования авторского алгоритма для поиска фатальных ошибок измерений в скалярном поле навигационных параметров при наличии значительного массива данных эксперимента методом компьютерной визуализации синтезируемой сплайновой изоповерхности. Предлагаемый новый подход может значительно упростить предварительный анализ апостериорной точности обширной базы данных, обеспечив последовательное адекватное использование навигационных параметров. Поскольку прерогативой предлагаемого метода является формальный поиск флуктационных ошибок, в рамках рассматриваемого подхода, нет необходимости задействовать специальные методы компьютерной анимации. Фиктивность измерений однозначно обнаруживается по шумовому пику промаха, неизбежно возникающему вследствие нарушения «гладкости» восстановленной сплайновой изоповерхности. Данная ошибка оперативно может быть исключена из файла данных измерений с минимальными временными затратами на обработку информации.

Практический синтез структуры навигационной изоповерхности любой сложности в комбинации с оригинальным методом исследования дифференцируемости обеспечивается функционированием программного обеспечения в автономной программной графической среде без привлечения зарубежных фирменных средств аффилированной компьютерной визуализации. Универсальность составленных программ обеспечивает качественное исследование дифференциальных свойств геометрического объекта любой размерности как вариативности широкого класса навигационных функций. Разработанный пакет прикладных программ является многофункциональным по возможности расчета и визуализации на компьютерном дисплее электронных проекций любой навигационной изоповерхности при использовании авторской программной оболочки. Перед аппроксимацией для синтезируемой изоповерхности следует делать геометрическую оценку сложности аппроксимируемого объекта с целью выбора оптимального способа решения задачи последующей аппроксимации. С этой целью автором статьи разработана специальная эффективная методика предварительного качественного исследования навигационной изоповерхности.

Актуальность постановки необходимости заблаговременного проведения качественного исследования навигационных изоповерхностей с целью их последующей аппроксимации с единых позиций теории сплайн-функций согласуется с прогнозированием появления сложных новейших навигационных изолиний, которые в перспективе придется применять в процессе технологической эволюции технических средств судовождения.

### Обсуждение (Discussion)

В условиях развития платформы географических информационных систем (ГИС) при математической обработки больших геопространственных данных создается прецедент ориентирования на унифицированную информацию при интегральном оценочно-прогнозном картографировании. В геометрической прогрессии возрастает значимость современности, достоверности и точности пространственных данных, что предъявляет высокие требования к их своевременному виртуальному обновлению в оперативные сроки. Формирование единого геоинформационного пространства на основе телекоммуникационных сетей с условием использования базы пространственных данных стимулирует комплексные решения в сфере автоматизации геоинформационного картографирования при создании анимационных изображений на основе ГИС<sup>8</sup>. В этом направлении впервые была отчетливо обозначена роль рекомендательных карт как средства обеспечения принятия решений.

По мнению известного американского картографа Дж. Л. Моррисона — бывшего президента Международной картографической ассоциации, имеющего большой опыт работы в геологической съемке США, картографическое производство, ориентированное на аналоговые методы составления и издания карт, безнадежно устарело и должно быть целиком переведено на эффективные электронные технологии с центром внимания на новые методы вычислительной математики [25]. Перспективы развития картографии в обозримом будущем связываются прежде всего с геоинформационными технологиями. Практическое совершенствование методов ГИС исключают необходимость готовить печатные тиражи карт или других изображений, поскольку в любой момент в режиме реального времени уже можно получить на компьютерном экране визуализированное изображение любого географического объекта. Внедрение электронных технологий фактически означает конец трехсотлетнего периода картографического черчения и издания печатной картографической продукции. При условии отказа в восприятии прогноза Дж. Л. Моррисона в качестве фантазии на картографические сюжеты авторитетное предположение экстраполирует современные тенденции электронной картографии и обеспечивает реалистичность ГИС на ближайшую временную перспективу.

Предоставление новых возможностей для пространственного анализа географических данных реализуется за счет оптимального подбора фактора гридирования при эффективном использовании специфичной математической сетки, что приводит к улучшению демонстрации изолиний на дисплее компьютера [12]. Пространственная компонента платформы картографических данных большой размерности стала объектом глобального внимания в вопросе современной обработки массивных геолокализированных данных, в которых местоположение является дополнительным атрибутом размерности [26]. В контексте геопространственных данных пространство и время неразрывно связаны, поскольку многие источники больших данных содержат временную информацию. Пространство может восприниматься как абстрактное, в то время как местоположение судна является всегда реалистичным, с чем судоводители обычно отождествляют себя в отображении позиционирования как части пространства. Обсервация как символ геоиконики придает географическому пространству однозначную фиксированность. Именно эти особенности многомерного местоположения судна могут быть смоделированы и спроецированы на электронную морскую карту. Интерфейсы картографирования больших данных способны привести к созданию картографии будущего, которая концептуализирует и визуализирует сложные представления о месте и пространстве в сочетании с фактором временного измерения. Это обещает дать картографам возможность решать нетривиальные проблемы компьютерной графики, связанные с достоверной геолокацией.

В течение последнего десятилетия геовизуализация претерпела значительную эволюцию в комплексный подход к исследованию, анализу и пониманию геопространственного феномена с целью поиска лучшей практики манипулирования картами с помощью цифрового взаимодействия [27]. Развитие геовизуализации было обусловлено доступностью разнообразных крупно-

<sup>8</sup> Берлянт А. М. Геоинформационное картографирование. М.: МГУ, 1997. 64 с.



масштабных геопространственных данных и достижениями в области технологий визуализации. Интеграция визуальной аналитики позволила внедрить расширенные технологические возможности в интерактивную визуализацию при улучшении обработки крупномасштабных данных. Следовательно, акцент сместился на поддержку принятия обоснованных решений в режиме реального времени и совместный анализ, одновременно способствуя ориентированному на пользователя практическому использованию подхода к визуализации и анализу геопространственных данных. Искусственный интеллект формирует будущее геовизуализации. Геопространственные данные большой разрешающей возможности [28] предполагают значительное смещение акцента с традиционной обработки инфраструктур универсальных данных путем принятия подхода, основанного на общих веб-стандартах, в эффективное функционирование геоинформационных систем с учетом мобильных устройств, высокопроизводительных сенсорных, жестовых, голосовых интерфейсов, облачных вычислений, дополненной реальности и других значительных достижений технологий.

Парадигма теоретизации визуальной аналитики виртуального картографирования представляют собой новый набор возможностей для синергии между обработкой и совместным анализом географических и кибернетических данных с целью достижения создания образцовых значимых карт с использованием больших геопространственных данных. Объем больших данных может значительно варьироваться от нескольких миллионов точек данных в наборе данных о перемещении в виде траекторий движения, до петабайт в источниках изображений [29]. Общим для различных размеров данных является то, что объем превышает возможности современных вычислительных систем по обработке информации.

Долгосрочное аналитическое взаимодействие со сложными пространственно-временными проблемами и большими геопространственными данными необходимо расценивать как стимул к действию по использованию прогрессивных возможностей ключевых аспектов морской картографии. Процесс создания карты по своей сути ориентируется на феномен обобщения, позволяющим найти здравый смысл в картографическом производстве векторных электронных карт [19]. По мере того как традиционные источники данных стереотипно ориентируются на возможности точно описывать каждую деталь морской навигационной карты, способы генерализации морского рельефа должны адаптироваться для обработки крупномасштабных данных на основе компьютерной географической визуализации. Требования к картографической абстракции в виде генерализации рельефа усиливаются при переходе к использованию систем скоординированного просмотра картографических визуализаций.

Интеграция технологии голосовых помощников в платформы визуализации и обработки геопространственных данных повышает доступность и интерактивность пользователей. Традиционные инструменты ГИС по ключевым вопросам часто создают проблемы для пользователей, не обладающих техническими знаниями, из-за сложных интерфейсов и терминологии. Веб-приложение с поддержкой голосовой связи устраняет эти ограничения за счет способности понимать команды, относящиеся к конкретной предметной области, для беспрепятственного взаимодействия с геопространственными данными. Перспективная система обрабатывает голосовые вводы для таких задач, как навигация по определенным координатам, переключение слоев и наложение геопространственных данных. Тестирование на реальных запросах позволило добиться 93 % точности преобразования голосовых команд в практические результаты, такие как управление информационными слоями в процессе навигации по электронной карте [30]. Результаты демонстрируют способность системы снижать когнитивную нагрузку, обеспечивая при этом естественное взаимодействие с геопространственными данными. Данное исследование предлагает масштабируемое решение для повышения удобства использования ГИС, прокладывая путь к более интуитивно понятным, доступным и интерактивным геопространственным инструментам.

Ввиду перспективной важности надлежащая математическая обработка морских пространственных данных обретает приоритет в предоставлении конечным пользователям обоснованной информации для различных целей, включая разработку политики принятия решений, управление



морской средой, морское пространственное планирование на основе улучшенной графической визуализации географических данных.

### Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Обоснована необходимость предварительного качественного исследования навигационной изоповерхности для обеспечения гарантии успешного применения алгоритмов сплайн-аппроксимации.
2. Апробирование применения методики исследования астронавигационной изоповерхности на дифференцируемость на конкретном примере формализации расчета высоты светила.
3. Рассмотрена вариативность практической применимости разработанного метода качественного исследования навигационной изоповерхности.
4. Разработан пакет прикладных паскаль-программ для исследования дифференциальных свойств любой навигационной изоповерхности.
5. Дано объяснение возможности практического применения оригинальной методики для будущих изоповерхностей, появление которых обусловлено технологическими инновациями судоходства.
6. Сопоставимый результат в современных научных публикациях отсутствует.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квасов Б. И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук; специальность: 01.01.07 «Вычислительная математика» / Б. И. Квасов. — Новосибирск, 1997. — 34 с. — EDN ZJIMNH.
2. Kvasov B. I. Methods of Shape-Preserving Spline Approximation / B. I. Kvasov — Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. — 338 p. DOI: 10.1142/4172.
3. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639. — EDN KSECWZ.
4. Болтаев А. К. Об оптимальной интерполяционной формуле на классах дифференцируемых функций / А. К. Болтаев // Проблемы вычислительной и прикладной математики. — 2021. — № 4(34). — С. 96–105. — EDN AAAQXX.
5. Лапшин Э. В. Кусочно-линейная интерполяция функций многих аргументов / Э. В. Лапшин, И. Ю. Семочкина, В. В. Самаров // Надежность и качество сложных систем. — 2017. — № 4(20). — С. 42–48. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-6. — EDN YNRRUM.
6. Ююкин И. В. Применение сплайновых интерполирующих функций в парадигме универсального стандарта обмена цифровыми гидрографическими данными / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 875–890. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-875-890. — EDN NNYQKH.
7. Стародетко Е. А. Методы описания и преобразования геометрической информации в автоматизированных системах технической подготовки производства: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Е. А. Стародетко. — М., 1974. — 26 с.
8. Васильева Е. В. Устойчивость периодических точек диффеоморфизмов многомерного пространства / Е. В. Васильева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. — 2018. — Т. 5. — № 3. — С. 356–366. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2018.302. — EDN XYTJDF.
9. Курахтенков Л. В. Разработка алгоритма построения изолиний по рассчитанным данным на сферической поверхности / Л. В. Курахтенков, А. А. Кучумов, К. Ю. Шкиль // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2017. — Т. 11. — № 5. — С. 21–25. — EDN YRQARP.
10. Wang W. Isoline extraction based on a global hexagonal grid / W. Wang, L. Zhou, A-X. Zhu, G. Lv // Cartography and Geographic Information Science. — 2025. — Vol. 52. — Is. 3. — Pp. 299–313. DOI: 10.1080/15230406.2024.2359709.

11. *Smith W. H. F.* Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension / W. H. F. Smith, P. Wessel // *Geophysics*. — 1990. — Vol. 55. — Is 3. — Pp. 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.
12. *Ююкин И. В.* Сплайновая модель оперирования гридированными данными как принцип электронного картографирования топографии морского дна / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675. — EDN PCOObT.
13. *Costan A.* Grid Data Handling / A. Costan // *Computational and Data Grids: Principles, Applications and Design*. — Hershey: Information Science Reference, 2012. — Pp. 112–139. DOI: 10.4018/978-1-61350-113-9.ch005.
14. *Souri A. H.* Dealing with spatial heterogeneity in pointwise-to-gridded-data comparisons / A. H. Sour, K. Chance, K. Sun, X. Liu, M. S. Johnson // *Atmospheric Measurement Techniques*. — 2022. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 41–59. DOI: 10.5194/amt-15-41-2022.
15. *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.
16. *Kvasov B.* Weighted cubic and biharmonic splines / B. Kvasov, T-W. Kim // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2017. — Vol. 57. — Is. 1. — Pp. 26–44.
17. *Taheri A. H.* Adaptive w-refinement: A new paradigm in isogeometric analysis / A. H. Taheri, K. Suresh // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. — 2020. — Vol. 368. — Pp. 113180. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113180.
18. *Schoenberg I. J.* Contribution to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions / I. J. Schoenberg // *Quarterly of Applied Mathematics*. — 1946. — Vol. 4. — № 1. — Pp. 45–99. DOI: 10.1090/qam/15914.
19. *Ююкин И. В.* Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934. — EDN QQIVCX.
20. *Ююкин И. В.* Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036. — EDN PSJYOY.
21. *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.
22. *Wang H.* Construction of B-spline surface from cubic B-spline asymptotic quadrilateral / H. Wang, C. G. Zhu, C. Y. Li // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. — 2017. — Vol. 11. — Is. 4. — Pp. JAMDSM0044. DOI: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0044.
23. *Воробьева Г. Р.* К вопросу построения пространственных изолиний для нерегулярных сетей мониторинга / Г. Р. Воробьева, Э. Ф. Фарваев // *Информационные технологии*. — 2024. — Т. 30. — № 10. — С. 544–552. DOI: 10.17587/it.30.544–552. — EDN TZFAHR.
24. *Ююкин И. В.* Поиск ошибок в базе навигационных данных методом визуализации сплайновой изоповерхности / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491. — EDN MUGGZV.
25. *Моррисон Дж. Л.* Картография нового тысячелетия / Дж. Л. Моррисон // *Геодезия и картография*. — 1996. — № 8. — С. 45–48.
26. *Loukili Y.* Geospatial big data platforms: A comprehensive review / Y. Loukili, Y. Lakhri, S. E. B. Ali // *KN — Journal of Cartography and Geographic Information*. — 2022. — Vol. 72. — Is. 4. — Pp. 293–308. DOI: 10.1007/s42489-022-00121-7.
27. *Andrienko N.* Geovisualization: past, present, and future / N. Andrienko, G. Andrienko // *International Journal of Cartography*. — 2025. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 224–234. DOI: 10.1080/23729333.2025.2475410.
28. *Li Z.* Geospatial Big Data Handling with High Performance Computing: Current Approaches and Future Directions / Z. Li // *High Performance Computing for Geospatial Applications* — Springer International Publishing, 2020. — С. 53–76. DOI: 10.1007/978-3-030-47998-5\_4.
29. *Robinson A. C.* Geospatial big data and cartography: research challenges and opportunities for making maps that matter / A. C. Robinson, U. Demšar, A. B. Moore, A. Buckley, B. Jiang, K. Field, M-J. Kraak, S. P. Cam-

boim, C. R. Sluter // International Journal of Cartography. — 2017. — Vol. 3. — Is. suppl. — Pp. 32–60. DOI: 10.1080/23729333.2016.1278151.

30. Jamil D. Exploring Geospatial Mapping through Speech Commands / D. Jamil, D. JyotiPatra, P. Kumar, S. Kar, P. Ghosh, S. Das, M. A. Mondal // 2025 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE) 2025. — C. 1–7. DOI: 10.1109/ICCECE61355.2025.10940999.

## REFERENCES

1. Kvasov, B. I. Metody izogeometricheskoy approksimatsii splaynami. Abstract of Grand PhD diss. Novosibirsk, 1997.

2. Kvasov, B. I. *Methods of Shape-Preserving Spline Approximation* Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. DOI: 10.1142/4172.

3. Yuyukin, I. V. “Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

4. Boltaev, A. K. “On the optimal interpolation formula on classes of differentiable functions.” *Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki* 4(34) (2021): 96–105.

5. Lapshin, E. V., I. Yu. Semochkina and V. V. Samarov. “Kusochno-lineynaya interpolatsiya funktsiy mnogikh argumentov.” *Reliability & Quality Of Complex Systems* 4(20) (2017): 42–48. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-6.

6. Yuyukin, I. V. “Application of spline interpolating functions in the paradigm of the universal standard exchange of digital hydrographic data.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 875–890. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-875-890.

7. Starodetko, E. A. Metody opisaniya i preobrazovaniya geometricheskoy informatsii v avtomatizirovannykh sistemah tehnicheskoy podgotovki proizvodstva. Abstract of Grand PhD diss. M., 1974.

8. Vasil'eva, E. V. “Stability of periodic points of diffeomorphisms of multidimensional space.” *Vestnik Of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy* 5.3 (2018): 356–366. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2018.302.

9. Kurakhtenkov, L. V., A. A. Kuchumov and K. Yu. Shkil'. “Razrabotka algoritma postroeniya izolinii po rasschitannym dannym na sfericheskoy poverkhnosti.” *T-Comm* 11.5 (2017): 21–25.

10. Wang, W., L. Zhou, A-X. Zhu and G. Lv. “Isoline extraction based on a global hexagonal grid.” *Cartography and Geographic Information Science* 52.3 (2025): 299–313. DOI: 10.1080/15230406.2024.2359709.

11. Smith, W. H. F., and P. Wessel. “Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension.” *Geophysics* 55.3 (1990): 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.

12. Yuyukin, I. V. “Spline model of gridded data operation as a principle of electronic mapping seabed topography.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.

13. Costan, Alexandru. “Grid Data Handling.” *Computational and Data Grids: Principles, Applications and Design*. Hershey: Information Science Reference, 2012. 112–139. DOI: 10.4018/978-1-61350-113-9.ch005.

14. Souri, Amir H., Kelly Chance, Kong Sun, Xiong Liu, and Matthew S. Johnson. “Dealing with spatial heterogeneity in pointwise-to-gridded- data comparisons.” *Atmospheric Measurement Techniques* 15.1 (2022): 41–59. DOI: 10.5194/amt-15-41-2022.

15. 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.

16. Kvasov, B. and T-W. Kim. “Weighted cubic and biharmonic splines.” *Computational Mathematics and Mathematical Physics* 57.1 (2017): 26–44.

17. Taheri, A. H. and K. Suresh. “Adaptive w-refinement: A new paradigm in isogeometric analysis.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 368 (2020): 113180. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113180.

18. Schoenberg, I. J. “Contribution to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions.” *Quarterly of Applied Mathematics* 4.1 (1946): 45–99. DOI: 10.1090/qam/15914.

19. 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.

20. Yuyukin, I. V. “Spline interpolation of navigational isolines.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
21. Volkov, Yu. S. and V. V. Bogdanov. “On error estimates of local approximation by splines.” *Sibirskii Matematicheskii Zhurnal* 61.5 (2020): 1001–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503.
22. Wang, H., C-G. Zhu and C-Y. Li. “Construction of B-spline surface from cubic B-spline asymptotic quadrilateral.” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 11.4 (2017): JAMDSM0044. DOI: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0044.
23. Vorob’eva, G. R. and E. F. Farvaev. “On the issue of constructing spatial isolines for irregular monitoring networks.” *Information Technologies* 30.10 (2024): 544–552. DOI: 10.17587/it.30.544-552.
24. Yuyukin, I. V. “Search for errors in the base of navigation data by the method of spline isosurface visualization.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.3 (2020): 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.
25. Morrison J. L. “Cartography of the new millennium.” *Geodesy and cartography* 12.3 (1996): 45–48.
26. Loukili, Y., Y. Lakhrissi and S. E. B. Ali. “Geospatial big data platforms: A comprehensive review.” *KN — Journal of Cartography and Geographic Information* 72.4 (2022): 293–308. DOI: 10.1007/s42489-022-00121-7.
27. Andrienko, N. and G. Andrienko. “Geovisualization: past, present, and future.” *International Journal of Cartography* 11.2 (2025): 224–234. DOI: 10.1080/23729333.2025.2475410.
28. Li, Z. “Geospatial Big Data Handling with High Performance Computing: Current Approaches and Future Directions.” *High Performance Computing for Geospatial Applications* Springer International Publishing, 2020: 53–76. DOI: 10.1007/978-3-030-47998-5\_4.
29. Robinson, A. C., C. R. Sluter, et al. “Geospatial big data and cartography: research challenges and opportunities for making maps that matter.” *International Journal of Cartography* 3.supl (2017): 32–60. DOI: 10.1080/23729333.2016.1278151.
30. Jamil, D., M. A. Mondal, et al. “Exploring Geospatial Mapping through Speech Commands.” *2025 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE)* 2025: 1–7. DOI: 10.1109/ICCECE61355.2025.10940999.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 20 мая 2025 г.  
Received: May 20, 2025.



## REQUIREMENTS FOR PERSONNEL OF THE SYSTEM FOR PROVIDING AUTOMATIC PILOTING AND MOORING OF VESSELS IN THE SEAPORT

**A. A. Golovina<sup>1</sup>, V. G. Senchenko<sup>1</sup>, S. D. Ayzinov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Admiral Ushakov Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

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

*The implementation of the smart port concept through the phased introduction of various interconnected systems is an important element in the development of autonomous navigation. One such component may be a system for providing autonomous piloting and mooring of vessels in a seaport, whose tasks include remote control of automated tugboats for cargo vessel piloting as well as monitoring the autonomous operation of the tugboats. However, the operation of such systems is not permissible without the supervision of properly trained personnel. Such personnel must ensure and monitor the safety of piloting and escorting operations for sea and river vessels, monitor, control and manage automatic tugboats in various operating modes, perform their technical maintenance and repair, as well as maintenance of other equipment for autonomous piloting and mooring, fulfil the operational procedures of the remote-control center, and communicate with other services. The authors conclude that it is necessary to develop, systematize and subsequently establish regulatory and legal requirements for the process and outcome of professional training of the external tug master, automated tug operator, remote control center administrator, remote control system engineer, pilot, service engineer at the base/terminal of automatic tugs, and service system engineer supporting the maintenance facility for automatic tugboats. The results obtained in this work can serve as a basis for further research, as well as for setting requirements for the professional training, qualifications, and experience of personnel for autonomous vessel piloting and mooring systems.*

*Keywords: autonomous ship, support system, automatic piloting, mooring, towing, seaport, staff, external master, specialist, requirements, legal regulation.*

### For citation:

Golovina, Anastasiya A., V. G. Senchenko and S. D. Ayzinov. "Requirements for personnel of the system for providing automatic piloting and mooring of vessels in the seaport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 534–544. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-534-544.

**УДК: 347.79**

## РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСОНАЛУ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРОВОДКИ И ШВАРТОВКИ СУДОВ МОРСКОГО ПОРТА

**А. А. Головина<sup>1</sup>, В. Г. Сенченко<sup>1</sup>, С. Д. Айзинов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск, Российская Федерация

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

*Темой работы является исследование в качестве важной составляющей концепции умного порта путем поэтапного внедрения различных взаимосвязанных систем для развития автономного судоходства. В качестве такой составляющей может быть использована система обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морском порту, задачами которой является дистанционное управление буксирами-автоматами для проводки грузового судна, а также контроль автономной работы буксиров-автоматов. Отмечается, что функционирование подобных систем недопустимо без контроля со стороны обученного персонала. Такой персонал должен обеспечивать и контролировать безопасность проводки и выполнения операций сопровождения морских и речных судов, мониторинг, контроль и управление*



буксирами-автоматами в различных режимах работы, их техническую эксплуатацию и ремонт, а также другого оборудования системы обеспечения автономной проводки и швартовки, выполнение требований эксплуатационных процедур центра дистанционного управления, обмен информацией с другими службами. Сделан вывод о необходимости разработки, систематизации и последующего нормативно-правового закрепления требований к процессу и результату профессионального обучения внешнего-капитана буксира-автомата, специалиста по эксплуатации буксира-автомата, администратора центра дистанционного управления, инженера-системотехника центра дистанционного управления, лоцмана, сервисного инженера пункта базирования буксиров-автоматов, сервисного инженера систем обеспечения пункта технического обслуживания буксиров-автоматов. Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы в качестве основы для дальнейших научных исследований, а также для разработки требований к профессиональной подготовке, квалификации и опыту персонала системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов.

**Ключевые слова:** автономное судно, система обеспечения, автоматическая проводка, швартовка, буксировка, морской порт, персонал, внешний капитан, специалист, требования правовое регулирование.

**Для цитирования:**

Головина А. А. Разработка требований к персоналу для работы системы обеспечения автоматической проводки и швартовки судов морского порта / А. А. Головина, В. Г. Сенченко, С. Д. Айзинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 534–544. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-534-544. — EDN DYRAXS.

### **Введение (Introduction)**

Внедрение новых технологий на транспорте является одним из важнейших условий долгосрочного инновационного развития морского транспортного комплекса. В этой связи представляет интерес внедрение морских автономных надводных судов (МАНС), что предполагает уменьшение количества членов экипажа на борту при удаленном управлении судном (полуавтономное судно) или дистанционное управление судном без экипажа на борту, а также с помощью использования современных технологий, программного обеспечения, приборов и устройств позволяет осуществлять судоходство в автоматическом режиме (автономное судно).

Концепция внедрения и эксплуатации МАНС в настоящее время является востребованной и становится предметом интереса представителей морской транспортной отрасли, так как предполагает снижение влияния на управление судном человеческого фактора — основной причины аварийности на морском флоте [1]–[3]. Таким образом, МАНС может повысить безопасность судоходства и эффективность перевозок, снизив при этом их себестоимость. Данный тезис находит подтверждение в положениях Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., что подтверждает актуальность настоящего исследования. При этом необходимо отметить, что данное направление предполагает не только создание МАНС их эксплуатацию, но и внедрение концепции *умного порта*, одной из составляющих которого должна стать система обеспечения автономной проводки и швартовки судов в морском порту (СОАПШ). Данная система предполагает использование буксиров-автоматов (БА) в качестве дополнительных маневренных мощностей транспортного судна, жесткую сцепку между ними, а также между транспортным судном и грузовым терминалом, дистанционное управление соответствующей группой судов, а также автономное управление группой буксиров-автоматов. Компонентами СОАПШ при этом должны стать БА, центр дистанционного управления (ЦДУ), мобильные пульта управления (МПУ), место базирования буксиров-автоматов (МБ), места временной стоянки буксиров-автоматов (МВС), пункт технического обслуживания буксиров-автоматов (ПТО), системы автоматизированной швартовки к причалам (САШ), система связи (СС) и персонал.

Некоторые особенности профессиональной подготовки, сходства и различия компетенций специалистов, управляющих МАНС удаленно, являлись объектом научных исследований таких специалистов, как А. А. Лентарев, Д. Е. Студеникин, Д. С. Зиферт, Э. А. Куку, В. В. Заслонов, Д. В. Казунин, В. В. Рыбий [4], А. Е. Трофимова [5] и др. Вопросы, связанные с особенностями, характерными для специалистов, эксплуатирующих МАНС удаленно в части их правового статуса

и ответственности, изучались в работах таких исследователей, как В. В. Ключев, В. Н. Гуцуляк [6], С. Н. Зайкова [7], А. В. Чижикова [8] и др. [9] Изучение научных трудов по этим вопросам играет важную роль в данном исследовании, так как обязанности персонала СОАПШ должны быть учтены при формировании комплекса соответствующих компетенций специалистов, требований к их знаниям, умениям, навыкам и личностным качествам.

А. А. Лентарев в публикации «Анализ существующих положений о сертификации и подготовке операторов автономных судов» [10] определил важность создания системы подготовки специалистов в области управления автономными судами и выработки соответствующих формально определяемых требований. В публикации «Соотнесение морской компетенции с функционалом работника отрасли» Д. Е. Студеникиным, Д. С. Зифертом, Э. А. Куку и В. В. Заслоновым [11] исследованы некоторые критерии в части знаний, умений и навыков, достижение которых свидетельствует о готовности соответствующего специалиста морским автономным судном.

Предметом настоящего исследования являются знания и навыки, необходимые для безопасного функционирования СОАПШ, а объектом — требования к квалификации, опыту и знаниям соответствующих специалистов для СОАПШ, а также выполняемые ими функции.

Целью настоящего исследования является определение основных требований к персоналу СОАПШ. Для достижения указанной цели необходимо решение комплекса задач, а именно:

- разработка общих требований к персоналу СОАПШ;
- формирование перечня состава персонала СОАПШ;
- формулирование функциональных обязанностей, требований к квалификации и опыту работы и знаниям соответствующих специалистов.

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

В ходе проведения исследования использовались общенаучные и частно-научные методы познания: анализ, синтез, сравнительно-правовой метод и др. Для решения задачи определения функциональных обязанностей, требований к квалификации и опыту работы, а также знаниям персонала СОАПШ использовался *метод моделирования* в целях уяснения содержания различных ситуаций, которые могут возникнуть в практике судоходства при внедрении СОАПШ. Поскольку для достижения цели настоящей работы необходимым условием является осуществление толкования действующих правовых норм для уяснения возможности их применения в условиях внедрения СОАПШ, были использованы логический, систематический, специально-юридический и грамматический методы толкования права.

К материалам, использованным в данном исследовании, относятся официальные тексты действующих нормативных правовых актов, регулирующих отношения в области определения компетенций ряда специалистов в области морского транспорта:

- Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года;
- Приказ Минтранса России от 06.11.2020 № 462 «Об утверждении Положения о морских лоцманах»;
- Приказ Минтранса России от 08.04.2024 № 117 «Об утверждении Положения о дипломировании членов внешних экипажей автономных морских судов».

### **Результаты и их обсуждение (Results and discussion)**

Проведенное исследование позволяет сделать выводы о том, что персонал СОАПШ должен обеспечивать безопасное проведение операций сопровождения транспортных судов, мониторинг, контроль и управление буксирами-автоматами и САШ при различных режимах эксплуатации, техническую эксплуатацию и ремонт БА и другого оборудования СОАПШ, а также выполнение требований эксплуатационных процедур ЦДУ и обмен информацией с другими службами.

ЦДУ должен быть укомплектован персоналом таким образом, чтобы соответствующих специалистов было достаточно для обеспечения безопасного проведения необходимых операций как в части сопровождения судов и управления БА и САШ, так и в области технического обслуживания последних, а также для решения иных задач. При этом должны соблюдаться требования в области охраны труда, рабочего времени и времени отдыха. Расчет количества персонала различных видов здесь может быть решен математически.

С учетом решаемых задач в штатном расписании ЦДУ БА должны быть предусмотрены следующие должности: внешний-капитан БА, специалист по эксплуатации БА, администратор ЦДУ, инженер-системотехник ЦДУ, лоцман, сервисный инженер пункта базирования БА и сервисный инженер систем обеспечения ПТО.

Круглосуточная деятельность ЦДУ обеспечивается сменной работой персонала. Состав, организация работы смен и сменное расписание устанавливаются администрацией ЦДУ. В помещении, где расположены рабочие места командного состава ЦДУ, круглосуточно одновременно находятся не менее двух человек, включая технического специалиста ЦДУ.

Администрация ЦДУ должна разработать должностные инструкции для персонала, в которых приводятся ссылки на эксплуатационные процедуры и дополнительные инструкции, которыми должен руководствоваться персонал ЦДУ при выполнении своих обязанностей.

Анализ содержания концепции СОАПШ для целей настоящего исследования позволяет определить функциональные обязанности, требования к квалификации и опыту, а также к знаниям указанных специалистов. Рассмотрим их применительно к каждой указанной ранее должности.

*Функциональные обязанности внешнего капитана БА:*

- разработка оперативного плана сопровождения транспортного судна;
- осуществление управления БА, группой БА и буксирным ордером с учетом навигационной и гидрометеорологической обстановкой в порту;
- обеспечение безопасности мореплавания в порту;
- управление САШ;
- соблюдение законов государства, международных, национальных и местных правил, других нормативных актов;
- связь с сопровождаемым транспортным судном;
- связь с СУДС, ИГПК.

В соответствии с Приказом Министерства транспорта РФ от 08.04.2024 № 117 «Об утверждении Положения о дипломировании членов внешних экипажей автономных морских судов»<sup>1</sup> (далее — Приказ) внешний капитан БА должен соответствовать установленным требованиям к квалификации и опыту работы внешнему капитану МАНС. Дополнительно к Приказу внешний капитан БА должен:

- пройти обучение по программе повышения квалификации в области управления автономными судами в российской образовательной организации, которая осуществляет подготовку членов внешних экипажей автономных судов, либо иностранной образовательной организации, находящейся на территории иностранного государства, с которым Российской Федерацией заключен договор о взаимном признании и эквивалентности документов об образовании;
- иметь действующее лоцманское удостоверение, выданное капитаном морского порта и подтверждающее квалификацию морского лоцмана, его право на осуществление лоцманской проводки судов определенных размеров и назначений в указанном районе лоцманской проводки судов;
- пройти соответствующую тренажерную подготовку.

Внешний капитан БА должен знать:

- географические, навигационные, метеорологические и гидрологические особенности зоны действия ЦДУ, в которой ЦДУ может осуществлять дистанционное управление навигацией;

<sup>1</sup> Приказ Минтранса России от 08.04.2024 № 117 «Об утверждении Положения о дипломировании членов внешних экипажей автономных морских судов» (Зарегистрировано в Минюсте России 31.05.2024 N 78406). СПС КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_478017](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_478017).

основные характеристики судопотоков, особенности работы морских портов и терминалов в зоне действия ЦДУ, в которой ЦДУ может осуществлять дистанционное управление навигацией; расположение и характеристики фарватеров, рекомендованных путей, схем разделения движения судов, запретных для плавания и постановки на якорь районов, навигационных и других полигонов в зоне действия ЦДУ, в которой ЦДУ может осуществлять дистанционное управление навигацией, и на прилегающей акватории; расположение навигационных опасностей, подводных кабелей, их ограждение предостерегающими знаками, места установки и характеристики береговых и плавучих средств навигационного оборудования в зоне действия ЦДУ, в которой ЦДУ может осуществлять дистанционное управление навигацией; расположение и характеристики причалов, районов и мест якорной стоянки, районов рейдовой погрузки и бункеровки, мест приема и высадки лоцманов в зоне действия ЦДУ, в которой ЦДУ может осуществлять дистанционное управление навигацией; задачи и функции ЦДУ, порядок и особенности их выполнения;

– основные технические и эксплуатационные характеристики, возможности и ограничения технических средств ЦДУ, методы и правила их использования операторами ЦДУ;

– организацию связи ЦДУ с судами, другими объектами, СУДС, смежными береговыми службами, порядок получения от них навигационной, метеорологической и другой необходимой для работы ЦДУ информации;

– порядок передачи информации, рекомендаций, предупреждений и указаний при взаимодействии с судами в зоне действия ЦДУ;

– положения нормативных и руководящих документов, регламентирующих

– организацию судоходства в зоне действия ЦДУ, деятельность ЦДУ и его операторов;

– особенности организации деятельности служб портового контроля, лоцманских, буксирных служб портов в зоне действия ЦДУ, в которой ЦДУ может осуществлять дистанционное управление навигацией; организацию и порядок взаимодействия ЦДУ со смежными береговыми службами в повседневных и чрезвычайных ситуациях;

– методы и правила переключения режимов контроля судов: мониторинг, поддержка принятия решений, дистанционное и автономное управление;

– методы и правила управления системой автоматизированной швартовки (САШ).

*Функциональные обязанности специалиста по эксплуатации БА:*

– контроль за техническим состоянием бортовых систем БА;

– контроль технического состояния места базирования и места временной стоянки;

– контроль технического состояния САШ;

– взаимодействие с администратором ЦДУ.

Требования к специалисту по эксплуатации БА соответствуют требованиям к специалисту, компетентному в области дистанционной эксплуатации судовой энергетической установки (СЭУ), электрооборудования и средств автоматики согласно Приказу:

а) наличие высшего технического образования;

б) наличие профессиональных знаний и умений в областях:

– контроля СЭУ, электрооборудования и автоматики автономного судна;

– управления СЭУ, электрооборудованием и автоматикой автономного судна;

– выполнения оперативных действий при выходе из строя СЭУ автономного судна, потере связи с автономным судном;

– идентификации состояния оборудования автономного судна;

– работы автоматизированных комплексов и средств автоматизации автономных судов;

– обеспечения управления системой дистанционного управления автономного судна;

в) наличие опыта работы не менее 3 лет в должности механика или первого механика судна с главными двигателями мощностью 330 кВт либо не менее 12 мес. в течение последних 5 лет в должности механика или первого механика судна с главными двигателями мощностью 330 кВт.



Дополнительно к Приказу Министерства транспорта Российской Федерации специалист по эксплуатации БА должен:

- пройти обучение по программе повышения квалификации в области дистанционной эксплуатации СЭУ, электрооборудования и автоматики в образовательной организации, имеющей лицензию на осуществление образовательной деятельности, которая осуществляет подготовку членов внешних экипажей автономных судов;
- пройти тренажерную подготовку по эксплуатации поста дистанционного контроля и иметь действующее свидетельство о прохождении подготовки (не старше 5 лет) в действующем ЦДУ или в тренажерном центре;
- пройти обучение по контролю технического состояния места базирования, места временной стоянки и САШ.

*Функциональные обязанности администратора ЦДУ:*

- обеспечение координации и согласованного взаимодействия всех операционных подразделений ЦДУ (ПДУ, ПДК), пункта базирования, сервисных специалистов;
- разработка графиков работы операционных подразделений ЦДУ согласно плану судозаходов, полученному от ИГПК администрации порта, распределение задачи и ресурсы между подразделениями ЦДУ;
- сбор и анализ данных о работе ЦДУ и БА, составление отчетов по выполненным операциям, эффективности и выявленным проблемам;
- в случае аварийных ситуаций координирует действия подразделений ЦДУ, оперативно взаимодействуя с внешними службами и организациями (портовые службы, спасательные службы, аварийные службы, сервисные инженеры).

*Требования, предъявляемые к администратору ЦДУ:*

- а) гражданство РФ;
- б) наличие высшего образования;
- в) наличие *профессиональных знаний и умений в областях:*
  - умение быстро и точно организовать работу персонала ЦДУ;
  - навыки планирования и управления временем для эффективного распределения рабочих задач и ресурсов;
  - навыки работы в программном обеспечении для управления ЦДУ, включая мониторинг информации и отчетности;
  - знание и понимание законодательных и нормативных актов на уровне государственных и муниципальных учреждений.
- г) подготовка по администрированию ЦДУ и *иметь действующее свидетельство* о прохождении подготовки (не старше 5 лет) в действующем ЦДУ или в тренажерном центре.

*Функциональные обязанности инженера-схемотехника ЦДУ:*

- защита данных и систем от кибератак;
- контроль работоспособности программного и аппаратного обеспечения ЦДУ;
- обновление ПО и ЭК ЭКНИС в ЦДУ;
- отслеживание и реагирование на инциденты безопасности.

*Требования, предъявляемые к инженеру-системотехнику:*

- а) гражданство РФ;
- б) наличие высшего технического образования в сфере ИБ или ИТ, либо наличие документа о профессиональной переподготовке в области ИБ;
- в) наличие профессиональных знаний и умений в информационных и компьютерных технологиях:
  - знания о компьютерных сетях, включая стек TCP/IP, модель OSI и защищенные сетевые протоколы;
  - практический опыт эксплуатации средств защиты информации, сканеров уязвимостей;
  - знание криптографических методов защиты информации;



- знание теории защиты информации, методов построения систем защиты информации, организации контроля выполнения требований по безопасности информации;
- знание рекомендаций стандартов по информационной безопасности;
- опыт администрирования ОС Windows, Linux.

г) знание общих вопросов права и специальные знания российского законодательства в области обработки и защиты персональных данных и иных видов информации (коммерческая тайна, тайна связи и т. д.).

Лоцман находится на борту транспортного судна, обеспечивая выполнение операции его сопровождения с помощью МПУ.

*Функциональные обязанности лоцмана:*

- осуществление визуального наблюдения за навигационной обстановкой с целью контроля движения ордера и выполнения всех стадий швартовки с применением группы БА;
- использование МПУ для контроля движения транспортного судна и подхода / отхода к / от причала (у);
- контроль местоположения судна методами инструментального и глазомерного определения навигационных параметров;
- управление упорами БА;
- осуществление учета гидрометеорологических и гидродинамических факторов, влияющих на судно при его проводке и швартовке;
- взаимодействие с внешним капитаном в ЦДУ;
- взаимодействие с капитаном транспортного судна;
- связь с СУДС, ИГПК;
- соблюдение законов государства, международных, национальных и местных правил, других нормативных актов.

Лицо, занимающее должности лоцмана, должно удовлетворять требованиям согласно Приказу Министерства транспорта РФ от 06.11.2020 № 462 «Об утверждении Положения о морских лоцманах»<sup>2</sup>. Дополнительно к Приказу Министерства транспорта РФ лоцман должен пройти тренажерную подготовку по управлению БА с помощью МПУ при проведении операции сопровождения транспортных судов, которые могут пользоваться сервисом СОАПШ в данном порту, и выполнении швартовки / отшвартовки транспортных судов к / от причала, оборудованных и необорудованных САШ, а также иметь действующее свидетельство о прохождении подготовки (не старше 5 лет) в действующем ЦДУ или на тренажерном центре.

*Функциональные обязанности сервисного инженера пункта базирования БА:*

- осуществление контроля стыковочных операций БА в пункте базирования;
- осуществление операции по зарядке/замене аккумуляторных батарей БА;
- обеспечение готовности береговых систем пункта базирования БА к эксплуатации и поддержание их в рабочем состоянии.

*Требования, предъявляемые к сервисному инженеру пункта базирования БА:*

- гражданство РФ;
- наличие высшего технического образования;
- наличие профессиональных знаний и умений в работе со специализированными инженерными инструментами и программным обеспечением, умение анализировать и решать сложные технические проблемы, знание нормативной и технической документации по эксплуатации и обслуживанию систем пункта базирования.
- стаж работы в должности инженера по эксплуатации оборудования I категории не менее 3 лет.

<sup>2</sup> Приказ Минтранса России от 06.11.2020 N 462 «Об утверждении Положения о морских лоцманах» (Зарегистрировано в Минюсте России 23.12.2020 N 61744). СПС КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_372328](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372328).

*Функциональные требования, предъявляемые к сервисному инженеру систем обеспечения ПТО:*

Необходимо наличие двух категорий сервисных инженеров ИТО: инженер-электромеханик и инженер навигационных систем и систем связи.

*Функциональные обязанности инженера-электромеханика:*

- проведение диагностики неисправностей электрических цепей, силовых электроэнергетических установок и других электромеханических элементов БА;
- зарядка / замена аккумуляторных батарей БА;
- осуществление плановых ТО и других сервисных работ с оборудованием БА.

Спецификация минимальных стандартов компетентности для инженеров электромехаников в соответствии с ПДНВ<sup>3</sup>:

- наблюдение за эксплуатацией электрических и электронных систем, а также систем управления БА;
- наблюдение за работой автоматических систем управления двигательной установкой и вспомогательными механизмами;
- эксплуатация генераторов и распределительных систем;
- эксплуатация и техническое обслуживание силовых систем с напряжением выше 1000 В;
- эксплуатация компьютеров и компьютерных сетей на БА;
- техническое обслуживание и ремонт электрического и электронного оборудования;
- техническое обслуживание и ремонт систем автоматики и управления главной двигательной установкой и вспомогательными механизмами.

*Функциональные обязанности инженера навигационных систем и систем связи:*

- техническое обслуживание и ремонт навигационного и связного оборудования на БА;
- техническое обслуживание и ремонт берегового оборудования основных и резервных каналов связи.

*Требования, предъявляемые к инженерам навигационных систем и систем связи:*

- гражданство РФ;
- наличие высшего технического образования;
- наличие профессиональных знаний и умений в областях:
- хорошее техническое мышление, умение разбираться в сложных системах и анализировать технические данные;
- навыки работы с навигационным оборудованием и оборудованием систем связи;
- знание нормативной и технической документации по эксплуатации и обслуживанию навигационного оборудования и оборудования систем связи.

### **Заключение (Conclusion)**

Автоматизация морского судоходства способствует появлению новых профессий, изменениям в системе кадрового обеспечения отрасли и подготовки специалистов в связи с меняющимся подходом к управлению судами. Данная статья является логичным продолжением работ, направленных на развитие автономного судоходства [12]–[17] и его систем, таких как СОАПШ, которые не могут быть реализованы без четкой и слаженной работы персонала, обеспечивающего его функционирование, а также выработки требований к опыту, квалификации и знаниям соответствующих специалистов. Это обуславливает необходимость выработки, систематизации и последующего формального закрепления требований к процессу и результату профессионального обучения внешнего капитана БА, специалиста по эксплуатации БА, администратора ЦДУ, инженера-системотехника ЦДУ, лоцмана, сервисного инженера пункта базирования БА, сервисного инженера систем обеспечения ПТО.

Результаты работы могут найти применение при определении перечня функциональных обязанностей соответствующих специалистов, а также в процессе формирования содержания

<sup>3</sup> Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (Лондон, 7 июля 1978 г.), с изм. и доп. СПС «Гарант». [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://base.garant.ru/2540787>.

их профессионального обучения, преподавания специальных курсов при профессиональной подготовке моряков уровня управления как в рамках получения ими высшего образования, так и в условиях дополнительного профессионального образования. Также представляется необходимым разработка и внедрение в образовательный процесс специализированных тренажеров, требования к которым также должны быть установлены с учетом функциональных обязанностей соответствующих специалистов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епихин А. И. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А. И. Епихин, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 3–1(53). — С. 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010. — EDN IKWJXK.
2. Литвин Т. А. Новации законодательного регулирования правового статуса морского судна / Т. А. Литвин, А. А. Попов // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2024. — № 1(46). — С. 109–111. — EDN UYBNUY.
3. Клюев В. В. Ответственность участников правоотношений при эксплуатации автономных надводных судов / В. В. Клюев // Образование и право. — 2023. — № 11. — С. 345–351. DOI: 10.24412/2076-1503-2023-11-345-351. — EDN ESRKVD.
4. Казунин Д. В. Навигационный тренажер для подготовки специалистов автономного судовождения на основе технологий дополненной и виртуальной реальности / Д. В. Казунин, В. В. Рыбий // Морской вестник. — 2023. — № 3(87). — С. 83–87. DOI: 10.56192/1812-3694\_2023\_87\_83. — EDN ONKIJN.
5. Трофимова А. Э. Проблемы подготовки специалистов в морской отрасли в перспективе внедрения автономного судоходства / А. Э. Трофимова // Океанский менеджмент. — 2024. — № 4(28). — С. 53–56. — EDN VSPBFC.
6. Гуцуляк В. Н. Правовые проблемы эксплуатации морских судов без экипажей / В. Н. Гуцуляк, В. В. Клюев // Государство и право. — 2021. — № 10. — С. 163–172. DOI: 10.31857/S102694520017270-8. — EDN PSRQBB.
7. Зайкова С. Н. Правовой статус внешнего капитана автономного надводного морского судна / С. Н. Зайкова, А. В. Титов // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 5(78). — С. 50–53. — EDN YMCLKP.
8. Чижикова А. В. Правовой статус капитана судна и судовладельца при эксплуатации автономных судов: недостатки правового регулирования / А. В. Чижикова, Ю. В. Диденко // Евразийский юридический журнал. — 2024. — № 7(194). — С. 39–41. DOI: 10.46320/2073-4506-2024-7-194-39-41. — EDN LHEOTI.
9. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel / A. Golovina // SHS Web of Conferences. — 2022. — Vol. 134. — Pp. 00114. DOI 10.1051/shsconf/202213400114. — EDN WPEUCZ.
10. Лентарев А. А. Анализ существующих Положений о сертификации и подготовке операторов автономных судов / А. А. Лентарев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 359–373. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-359-373. — EDN LOLLEZ.
11. Студеникин Д. Е. Соотнесение морской компетенции с функционалом работника отрасли / Д. Е. Студеникин, Д. С. Зиферт, Э. А. Куку, В. В. Заслонов // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 4(113). — С. 50–54. DOI: 10.34046/aumsuomt113/7. — EDN BWUTEU.
12. Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6(34). — С. 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28. — EDN VCKKXN.
13. Karetnikov V. Development of methods for maneuvering trials of autonomous ships in test water area / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 130 LNCE. — Pp. 503–508. DOI 10.1007/978-981-33-6208-6\_5. — EDN PHCRQD.
14. Каретников В. В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15. — EDN KFIHYI.

15. Буцанец А. А. Исследование проблемы построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов через судоходные шлюзы / А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, Т. А. Волкова // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129. — EDN OQMZNO.

16. Айзинов С. Д. Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С. Д. Айзинов, А. А. Буцанец, С. В. Смоленцев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83–96. — EDN HNHFAA.

17. Karetnikov V. Simulation of maneuvering trials of an unmanned or autonomous surface ship on a navigation simulator / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 130 LNCE. — P. 146–156. DOI 10.1007/978-981-33-6208-6\_15. — EDN JJVLQH.

## REFERENCES

1. Epikhin, A. I. and M. A. Modina. “Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses.” *Morskie intelektual'nye tekhnologii* 3–1(53) (2021): 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010.

2. Litvin, T. A. and A. A. Popov. “Innovations in the legislative regulation of the legal status of a ship.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 1(46) (2024): 109–111.

3. Klyuev, V. V. “Responsibilities of legal relation parties of autonomous surface vessel operation.” *Obrazovanie i pravo* 11 (2023): 345–351. DOI: 10.24412/2076-1503-2023-11-345-351.

4. Kazunin, D. V. and V. V. Rybiy. “Navigatsionnyy trenazher dlya podgotovki spetsialistov avtonomnogo sudovozhdeniya na osnove tekhnologiy dopolnennoy i virtual'noy real'nosti.” *Morskoy Vestnik* 3(87) (2023): 83–87. DOI: 10.56192/1812-3694\_2023\_87\_83.

5. Trofimova, A. E. “Problems of crew education for marine industry with perspective of the introduction of autonomous navigation.” *Okeanskiy menedzhment* 4(28) (2024): 53–56.

6. Gutsulyak, V. N. and V. V. Klyuev. “Legal problems of the unmanned sea vessels operation.” *State And Law* 10 (2021): 163–172. DOI: 10.31857/S102694520017270-8.

7. Zaykova, S. N. and A. V. Titov. “Legal status of an external captain of an autonomous above-water marine ship.” *Transport Rossiyskoy Federatsii* 5(78) (2018): 50–53.

8. Chizhikova, A. V. and Yu. V. Didenko. “Legal status of the ship's captain and shipowner in the operation of autonomous vessels: shortcomings of legal regulation.” *Evrasiyskiy yuridicheskiy zhurnal* 7(194) (2024): 39–41. DOI: 10.46320/2073-4506-2024-7-194-39-41.

9. Golovina, A. “On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel.” *SHS Web of Conferences*. Vol. 134, 2022: 00114. DOI 10.1051/shsconf/202213400114.

10. Lentarev, A. A. “Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 359–373. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-359-373.

11. Studenikin, D. E., D. S. Zifert, E. A. Kuku and V. V. Zaslono. “Correlation of maritime competence with the functionality of an industry employee.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(113) (2024): 50–54. DOI: 10.34046/aumsuomt113/7.

12. Smolentsev, S. V. “The problem of estimation of navigation situation in the sea.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.

13. Karetnikov V. Ol'khovik E., Butsanets A. and Ivanova A. “Development of methods for maneuvering trials of autonomous ships in test water area.” *Lecture Notes in Civil Engineering* 130 LNCE (2021): 503–508. DOI 10.1007/978-981-33-6208-6\_5.

14. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh and A. A. Butsanets. “On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.

15. Butsanets, A. A., N. M. Ksenofontov and T. A. Volkova. “Studying the problem of constructing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels through shipping locks.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.

16. Ayzinov, S. D. et al. “Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous ship-ping.” *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 74 (2024): 83–96.
17. Karetnikov, V., E. Ol’khovik, A. Butsanets and A. Ivanova “Simulation of maneuvering trials of an un-manned or autonomous surface ship on a navigation simulator” *Lecture Notes in Civil Engineering* 130 LNCE (2021): 146–156. DOI 10.1007/978-981-33-6208-6\_15.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Головина Анастасия Алексеевна** —

старший преподаватель кафедры

«Публичное право»

ФГБОУ ВО «Государственный морской

университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»

353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,  
пр. Ленина, 93

e-mail: [a.golovina@mail.ru](mailto:a.golovina@mail.ru)

**Сенченко Виктор Григорьевич** —

кандидат технических наук, профессор,

руководитель научно-исследовательской

лаборатории «Автоматизация судовождения»

ФГБОУ ВО «Государственный морской

университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»

353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,  
пр. Ленина, 93

e-mail: [victor.senchenko@mail.ru](mailto:victor.senchenko@mail.ru)

**Айзинов Сергей Дмитриевич** —

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: [AjzinovSD@gumrf.ru](mailto:AjzinovSD@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Golovina, Anastasiya A.** —

senior lecturer at the department

of Public law

Admiral Ushakov State

Maritime University,

93, Lenin’s avenue, Novorossisk, 353924,

Russian Federation

e-mail: [a.golovina@mail.ru](mailto:a.golovina@mail.ru)

**Senchenko, Viktor G.** —

Grand PhD,

head of the scientific research laboratory

“Automation of Navigation”, professor of Admiral

Ushakov State

Maritime University,

Russia, Novorossisk,

Lenin’s avenue, 93.

e-mail: [victor.senchenko@mail.ru](mailto:victor.senchenko@mail.ru)

**Aizinov, Sergei D.** —

PhD Admiral

Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: [AjzinovSD@gumrf.ru](mailto:AjzinovSD@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию: 17 июня 2025

Received: June 17, 2025



## ON THE POSSIBILITY OF CONTINUING OPERATION OF VOLGONEFT-TYPE TANKERS PROVIDED TIMELY, HIGH-QUALITY REPAIRS ARE PERFORMED

**A. B. Krasiuk, A. A. Butsanets**

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

*This article addresses issues related to the duration of accident-free operation of Volgoneft-type tankers, project No. 1577, provided that high-quality repairs and modernization are carried out. The relevance of the study is due to the accident that occurred on December 15, 2024, in the Kerch Strait, where two vessels of this project (Volgoneft-212 and Volgoneft-239) were wrecked, leading to an environmental disaster caused by fuel oil spill. The paper examines possible causes of the accident, including failure to comply with requirements of the Russian classification society (RS), overloading, and lack of high-quality hull repairs. The article considers the hypothesis that the reliability of vessel operation is determined not by their age, but by their technical condition, which is ensured by the shipowner through regular inspections combined with high-quality hull repair. The article presents the results of strength calculations for tanker hulls carried out in 2019–2024 and provides data on modernization, including the replacement of structures with high-strength steel (RS D32 with a yield strength of 315 MPa), raising of the second bottom, and relocation of bulkheads in the cargo area according to MAKO requirements. The design features of the vessels, their classification restrictions, and the influence of residual deformations, such as overall residual buckling, on the probability of hull fracture are analyzed. Special attention is given to hazardous sections in the cargo tank area, where fractures occurred in the wrecked vessels. To increase reliability, it is proposed to reinforce the hulls with additional strips at the most weakened connections (deck covering or bottom plating), which is an economically efficient solution. The conclusion is made that, subject to compliance with the Russian classification society's requirements for regular technical inspections and an individual approach to repairs, Volgoneft-type tankers can continue safe and effective operation despite their average age of 48 years in 2025. The results show that modernized tankers have sufficient strength reserve for safe operation within the RCS classes ("XM-PR 2.5" or "XM-SP 3.5").*

**Keywords:** Volgoneft-type tanker, safe navigation, technical condition, ship hull, high-quality repair, hull modernization, strength calculations, hull reinforcement.

### **For citation:**

Krasiuk, Alla B. and A. A. Butsanets. "On the possibility of continuing to operate Volgoneft-type tankers, provided that they undergo timely, high-quality repairs." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.4 (2025): 545–557. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-545-557.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТАНКЕРОВ ТИПА «ВОЛГОНЕФТЬ» ПРИ УСЛОВИИ СВОЕВРЕМЕННОГО КАЧЕСТВЕННОГО РЕМОНТА

**А. Б. Красюк, А. А. Буцанец**

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

*Темой работы является исследование вопросов длительности безаварийной эксплуатации танкеров типа «Волgoneфть» проекта № 1577 при условии качественного ремонта и модернизации. Актуальность работы обусловлена произошедшей 15 декабря 2024 г. аварией в Керченском проливе, где два судна проекта («Волgoneфть-212» и «Волgoneфть-239») потерпели крушение, вызвав экологическую катастрофу из-за выброса мазута. Рассмотрены возможные причины аварии, включая несоблюдение требований Российского классификационного общества, перегруз, отсутствие качественного ремонта корпусов. Выполнен анализ гипотезы о том, что надежность эксплуатации судов определяется не их возрастом, а техническим состоянием, которое в свою очередь обеспечивается судовладельцем через регулярные освидетельствования в совокупности с качественным ремонтом корпуса. Представлены результаты*

прочностных расчетов корпусов танкеров, выполненных в 2019–2024 гг., и данные о модернизации, включающей замену конструкций на сталь повышенной прочности (РС D32 с пределом текучести 315 МПа), подъем второго дна и перенос переборок в грузовой зоне в соответствии с требованиями МАКО. Рассмотрены особенности конструкции судов, их классификационные ограничения и влияние остаточных деформаций, таких как общий остаточный перегиб, на вероятность перелома корпуса. Особое внимание уделено опасным сечениям в районе грузовых танков, где произошли переломы у потерпевших крушение судов. Для повышения надежности предлагается усиление корпусов путем установки полос подкрепления на наиболее ослабленные связи (настил палубы или обшивку днища), что является экономически эффективным решением. Сделан вывод о том, что при соблюдении требований Российского классификационного общества в части регулярного контроля технического состояния и индивидуального подхода к ремонту танкеры «Волгонефть» могут продолжать безопасную и эффективную эксплуатацию несмотря на возраст, составляющий в среднем 48 лет в 2025 г. Результаты расчетов показывают, что модернизированные танкеры обладают достаточным запасом прочности для безопасной эксплуатации в рамках классов РКО («ХМ–ПП 2,5» или «ХМ–СП 3,5»).

**Ключевые слова:** танкер типа «Волгонефть», безопасное судоходство, техническое состояние, корпус судна, качественный ремонт, модернизация корпуса, прочностные расчеты, усиление корпуса.

#### **Для цитирования:**

Красюк А. Б. Исследование вопроса возможности дальнейшей эксплуатации танкеров типа «Волгонефть» при условии своевременного качественного ремонта / А. Б. Красюк, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 545–557. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-545-557. — EDN DYSASI.

### **Введение (Introduction)**

15 декабря 2024 г. в Керченском проливе произошло крушение двух танкеров проекта № 1577 типа «Волгонефть». Авария сопровождалась выбросом мазута в акваторию Черного моря. До настоящего времени высказываются мнения о необходимости вывода всех судов типа «Волгонефть» из эксплуатации независимо от фактического технического состояния каждого из судов данного проекта. В Научном центре (НЦ) ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» в течение нескольких десятилетий выполнялись исследования корпусов судов по заказу судоводительских компаний. Были выполнены работы по расчету и оценке общей прочности корпуса судов и местной прочности их элементов, разрабатывались методы и обосновывались объемы ремонта. В рамках данных исследований специалистами лаборатории «Ремонта корпусов судов» были выполнены расчеты прочности корпусов судов типа «Волгонефть», принадлежащих другому судовладельцу. В течение ряда лет (2018–2023 гг.) проводилась работа по составлению и согласованию отчетов по группе танкеров данного проекта с инспекторами Российского классификационного общества (РКО). По некоторым исследуемым судам расчеты прочности и оценка их надежности выполнялись 2–3 раза при очередных освидетельствованиях.

В научной литературе рассматриваются различные аспекты прочности корпусов судов. Например, в некоторых работах [1]–[5] исследуются остаточные деформации корпусов (общие и местные), рассматриваются методические основы дефектации стальных конструкций, а также вопросы влияния погрешностей измерений на прочность и способы повышения точности, а также предлагаются новые подходы мониторинга, такие как использование телеуправляемых подводных аппаратов для неразрушающего контроля. В публикациях [5]–[10] выполнен анализ надежности корпусов с учетом остаточных деформаций (общих и местных), разработаны способы расчета надежности с учетом ремонтов и условий эксплуатации. Работы по ремонту судов речного флота, механизации инструментального контроля и патент на метод контроля наружной обшивки отражают переход от теории к практическим рекомендациям, включая интеграцию ремонтов в модели надежности. В публикациях [11]–[16] рассмотрены вопросы влияния деформаций на элементы корпусов, математические модели и алгоритмы для проведения инспекций. Обсуждаются перспективные направления корректировки дефектации для судов смешанного плавания, а также изменения технического состояния из-за износа. При этом в литературе не рассматриваются вопросы, касающиеся ремонта корпуса судов типа «Волгонефть».

В средствах массовой информации описаны различные версии причины аварии, а также рассматриваются их последствия [17], [18]. В частности, существует мнение о необходимости списания данного проекта судов еще 10–15 лет назад. Однако надежность корпуса судна зависит не столько от возраста, сколько от его технического состояния, за которое отвечает судовладелец. Обеспечение надежной эксплуатации судна судовладельцем подразумевает соблюдение периодичности качественных освидетельствований и ремонтов, а также выполнение работ по модернизации корпуса судна.

В настоящее время основное внимание специалистов сосредоточено на проблеме ликвидации экологических последствий, вызванных крушением танкеров в Керченском проливе. Необходимо всесторонне исследовать причины наступления этой масштабной экологической катастрофы.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Обзор первопричин гибели танкеров.* Причинами вывода судна из эксплуатации вследствие наступления аварийного случая (без возможности его последующего восстановления) являются:

- затопление вследствие потери остойчивости;
- перелом корпуса, как это произошло в случае гибели т/х «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239».

Понятие надежной эксплуатации судна связано с понятиями: *дефект* и *отказ*. При этом более 95 % всех дефектов судна не приводят к его отказу, гибели и выводу из эксплуатации. Часть дефектов корпуса являются вполне прогнозируемыми при условии регулярного слежения за техническим состоянием. Что касается такого вида отказа, как *перелом корпуса*, то его также можно считать прогнозируемым, и для исключения возможности его возникновения необходимо:

- соблюдение предусмотренных классом и районом плавания (в данном случае Российским классификационным обществом (РКО) условий эксплуатации;
- соблюдение сезонных ограничений к плаванию (наличие или отсутствие класса «лед» в формуле класса судна);
- соблюдение действующей и одобренной РКО «Инструкции для капитана по погрузке-выгрузке» или иного по названию, но аналогичного по содержанию документа (исключение перегруза);
- своевременное и качественное выполнение ремонта корпуса судна;
- проверка уровня общей прочности корпуса судна после ремонта, подтверждающая соответствие судна классу, указанному в «Свидетельстве на годность к плаванию».

В случае соблюдения указанных требований перелом судна может произойти только в случае форс-мажорных обстоятельств, вызванных глобальным потеплением, а именно: цунами, смерчи, бури, изменение параметров ветроволнового режима и др. Следует отметить, что строгое соблюдение всех действующих на момент оценки требований РКО обеспечивает такой запас общей прочности корпуса, что его перелом не может произойти в принципе. Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что существует комплекс причин перелома корпусов судов «Волгонефть-239» и «Волгонефть-212»: несоблюдение требований класса судна, возможный перегруз, некачественный ремонт и отсутствие модернизации корпуса.

*Опыт эксплуатации и общая характеристика технического состояния танкеров типа «Волгонефть».* Связь возраста судна с вероятностью возникновения такого отказа, как перелом корпуса, обусловлена существенным, имеющим основополагающее значение качеством ремонта и технического обслуживания судов. В 2015–2025 гг. отечественный флот начал пополняться нефтеналивными судами новой постройки (в том числе внутреннего плавания), однако, из-за дефицита провозной способности, старые суда все еще используются и работают надежно и эффективно. В частности, имеется опыт эксплуатации нефтеналивных судов более старого проекта № 576ТМ «М-ПР 2,5 (лед 10)», 1961 г. постройки, поддерживающим ремонтом в 2017 г., ремонтом в 2019 г. и работой до 2023 г.

Базовым для эксплуатирующихся в настоящее время танкеров типа «Волгонефть» пр. № 1577 являлся проект № 550А, а также его модификация — проект № 558. Дата начала строительства серии 1959 г. По данному проекту построили около 80 судов.

Для судов проекта № 558 в СПГУВК (ныне — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) были выполнены следующие расчеты их общей прочности:

1. В 2014 г. по т/х «Волгонефть-41» с классом «\*О-ПР 2,0 м» (на момент расчета возраст судна составлял 45 лет). Свидетельство на годность к плаванию продлевалось на 5 лет.

2. В 2018 г. выполнен расчет прочности теплохода «Волгонефть-56» проекта № 558 класса «\*О-ПР 2,0 м» (на момент расчета возраст судна составлял 52 года).

Несмотря на возраст судов, с учетом ограничения класса и качества выполненных ремонтных работ, общая прочность на момент выполненных расчетов была обеспечена, о чем свидетельствует дальнейшая эксплуатация данных судов. По откорректированному проекту № 1577 велось строительство танкеров в период 1969–1982 гг. Всего по проекту № 1577 было построено около 70 единиц флота.

На момент первого расчета прочности корпуса танкера с исходным проектом № 1577 в лаборатории «Ремонта корпусов судов» ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова в 2018 г. возраст первого судна составлял 45 лет. Основная часть расчетов прочности корпусов судов типа «Волгонефть» в лаборатории ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова была выполнена в период 2019–2024 гг.

Необходимо отметить, что по группе судов с исходным проектом № 1577 до момента выполнения проверки прочности в лаборатории ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова в предыдущие годы (указано в табл. 1) были выполнены работы по модернизации судов, связанные со значительными объемами замены корпусных конструкций в средней (грузовой) части (районе цилиндрической вставки). Так, при обновлении танкеров типа «Волгонефть» была предусмотрена замена корпусных конструкций с использованием листовой и профильной стали РС D32 с пределом текучести  $R_{\text{ен}} = 315$  МПа. Была выполнена замена обшивок, настилов и набора корпуса судна в районе грузовых трюмов. Для большинства анализируемых судов их *грузовая зона на момент расчета прочности представляла собой практически новый корпус*. Кроме того, у анализируемых судов работы по их модернизации предусматривали подъем уровня второго дна и перенос расположения непроницаемых переборок в грузовой зоне в соответствии с требованиями МАКО.

*Особенности конструкции и классификационные ограничения модернизированных судов типа «Волгонефть».* Суда типа «Волгонефть» представляют собой однопалубные, двухвинтовые наливные суда смешанного *река–море* плавания с восемью грузовыми танками, двойным дном, двойными бортами, баком и ютом, с кормовым расположением жилой надстройки, машинного отделения, переходным мостиком в ДП судна, наклонным форштевнем и крейсерской кормой. Данные суда предназначены для перевозки нефтепродуктов I, II, III, IV классов, в том числе требующих подогрева без ограничений по температуре вспышки.

Средний возраст эксплуатирующихся судов проекта № 1577 в 2025 г. составляет 48 лет (при среднем возрасте списания данных судов 38,8 лет). В табл. 1 приведены сведения по судам типа «Волгонефть», по которым выполнялись расчеты прочности в лаборатории ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова.

Таблица 1

Характеристики судов типа «Волгонефть»

| Наименование судна | Год постройки | Проект и класс на момент постройки | Модернизация корпуса, год | Год выполнения расчета прочности и возраст судна | Проект и класс на момент расчета прочности | Возраст судна в 2025 г. |
|--------------------|---------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| «Волгонефть-261»   | 1978          | 1577 «*М-СП»                       | 2017                      | 2021, 43 года                                    | 1577/5878 «*М-ПР 2,5»                      | 47                      |



Таблица 1  
(Окончание)

|                   |      |                      |                                                    |                  |                               |    |
|-------------------|------|----------------------|----------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|----|
| «Волго-нефть-250» | 1975 | 1577<br>«М-СП»       | 2005, и 2021<br>(подъем<br>второго дна)            | 2021,<br>46 лет  | 1577/5867<br>«М-СП 3,5»       | 50 |
| «Волго-нефть-251» | 1975 | 1577<br>«М-СП»       | 2004–2005,<br>2020–2021<br>(подъем<br>второго дна) | 2021,<br>46 лет  | 1577/5876<br>«М-СП 3,5»       | 50 |
| «Волго-нефть-254» | 1976 | 550А(1577)<br>«М-СП» | 2017                                               | 2021,<br>45 лет  | 550А(1577)/5643<br>«М-ПР 2,5» | 49 |
| «Волго-нефть-259» | 1977 | 1577<br>«М-СП»       | 2014                                               | 2019,<br>42 года | 1577/5876<br>«М-СП 3,5»       | 48 |
| «Волго-нефть-266» | 1979 | 1577<br>«М-СП»       | 2012                                               | 2019,<br>40 лет  | 1577/5886<br>«М-СП 3,5»       | 46 |
| «Волго-нефть-267» | 1979 | 1577<br>«М-СП»       | 2012                                               | 2019,<br>40 лет  | 1577/5876<br>«М-СП 3,5»       | 46 |

Из табл. 1 видно, что по всем судам в выборке были выполнены работы по модернизации, а по некоторым судам — дважды. Причем при однократной модернизации замена основных несущих элементов корпуса в средней части на аналогичные конструкции из стали повышенной прочности осуществлялась в совокупности с подъемом настила второго дна и переносом переборок в грузовой зоне. При модернизации корпусов судов работы проводились в два этапа: на первом этапе выполнялся усиленный ремонт, а на втором — подъем уровня настила второго дна.

Несмотря на значительные объемы и высокую стоимость работ по модернизации судна в целях обеспечения эксплуатации с классами РКО «М-СП» и «М-ПР5» ответственный владелец данных судов не подавал заявку на возобновление ледового класса. При этом следует отметить, что фактические остаточные толщины элементов конструкций исследуемых судов в районе ледового пояса на момент выполнения расчетов прочности удовлетворяли требованиям ледовой категории «лед-10», а иногда и ледовой категории «лед-20».

Наличие в формуле класса РКО знака «лед» допускает эксплуатацию судов в межнавигационный период. Уровень ледового класса устанавливается исходя из обеспечения местной прочности элементов ледового пояса (полноклассное судно — «лед 40») и ряда ограниченных ледовых классов: «лед 30», «лед 20» и «лед 10». Отсутствие в формуле класса знака «лед» ограничивает не только сезоны плавания, но и допускаемые к эксплуатации районы. *Является ли причиной гибели танкеров в керченском проливе отсутствие класса «лед»?* Безусловно, это служит основной причиной потери общей прочности и перелома корпуса в связи с выходом судов за пределы предусмотренного классом района эксплуатации. Так, действующим классом т/х «Волгонефть-212» являлся класс РКО «М-ПР 2,5», т/х «Волгонефть-239» класс РКО «О-ПР 2,0». Модернизация данных судов не осуществлялась.

*Анализ районов плавания судов.* В соответствии с требованиями РКО допускается эксплуатация судов во внутренних и морских водных бассейнах, если ограничения в формуле класса судна не ниже параметров водного бассейна, включая ограничения по сезонам эксплуатации. Так, к водным бассейнам разряда «М-ПР» относятся: Азовское море в сезон с марта по ноябрь; 10-мильная прибрежная зона от Керченского пролива до порта «Новороссийск» — для судов с допустимым значением высоты волны в формуле класса до 2,0 м в сезон с марта по ноябрь, а для остальных судов с апреля по сентябрь. Учитывая, что авария произошла 15 декабря, ни одно из потерпевших крушение судов не имело допуска к эксплуатации в данное время и в данном месте. Особенно это касается т/х «Волгонефть-239», имеющего класс РКО на момент аварии «О-ПР 2,0», что ниже разряда водного бассейна.



## Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

*Влияние конструкции корпуса на место возникновения перелома.* Критерием гарантии общей прочности корпуса судна и отсутствия вероятности его перелома является соблюдение условия:

$$M_{\text{пр.экс}} \geq K_{\text{годн}} |M_p|, \quad (1)$$

где  $M_{\text{пр.экс}}$  — предельный момент корпуса, определенный с учетом износов и остаточных деформаций для прогиба и перегиба по абсолютной величине, кН · м;

$K_{\text{годн}}$  — нормативное значение коэффициента запаса прочности для годного технического состояния, определяемое по табл. Прил. 1.3.3 Правил РКО<sup>1</sup> и равное для судна класса «М–СП» — 1,27, для класса «М–ПР»<sup>2</sup>;

$|M_p|$  — расчетный изгибающий момент при прогибе и перегибе, взятый по модулю.

Предельный момент корпуса судна в эксплуатации согласно [1] вычисляется по формуле Прил. 1.3.2–1 Правил РКО:

$$M_{\text{пр.экс}} = 10^3 \cdot W_{\text{пр.экс}} \cdot \sigma_{\text{оп}}, \quad (2)$$

где  $W_{\text{пр.экс}}$  — момент сопротивления рассматриваемого сечения корпуса, определенный с учетом имеющихся в связях в данный момент времени остаточных толщин и параметров деформаций в этом сечении, исходя из предположения о том, что в одной из точек сечения напряжения равны опасным, относительно этой связи, м<sup>3</sup>;

$\sigma_{\text{оп}}$  — опасное напряжение в указанной связи, зависящее от предела текучести материала корпуса и того, несет данная крайняя связь поперечную нагрузку или нет, МПа.

Для судов, указанных в табл. 1, основные несущие конструкции при модернизации были заменены аналогичными новыми изготовленными из стали повышенной прочности (сталь РС D32 с пределом текучести  $R_{\text{ен}} = 315$  МПа взамен предусмотренной исходным проектом стали с пределом текучести  $R_{\text{ен}} = 290$  МПа). Это наряду с большим значением момента сопротивления из-за наличия в корпусе конструкций с нулевым износом, обеспечивает и больший запас прочности, и большее значение предельного момента корпуса.

Вместе с тем как у исходного проекта № 1577, так и у модернизированных судов имеет-ся так называемое *опасное сечение*. Это сечение корпуса имеет более ослабленную конструкцию по сравнению с районом расположения грузовых танков. Кроме того, конструкции данного более ослабленного сечения выполнены из стали с пределом текучести  $R_{\text{ен}} = 235$  МПа. Такие наиболее опасные сечения традиционно проверяются, несмотря на то, что они и не всегда являются наиболее опасными с точки зрения опасности возникновения перелома.

В табл. 2 приведены сведения об остаточных моментах сопротивления корпусов судов. Видно, что наименьшие моменты сопротивления крайних связей корпуса у т/х «Волгонефть-254» с классом РКО «М–ПР 2,5», а на судах, эксплуатирующихся с классом «М–СП 3,5», имеют наихудшие значения для корпуса в средней части т/х «Волгонефть-250», для района шп. 170 — т/х «Волгонефть-267».

Таблица 2

Моменты сопротивления корпусов судов

| Наименование судна                                             | Момент сопротивления |        |         |        |                              |        |         |        |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|--------|---------|--------|------------------------------|--------|---------|--------|
|                                                                | Средняя часть        |        |         |        | Ослабленное сечение (шп.170) |        |         |        |
|                                                                | Палуба               |        | Днище   |        | Палуба                       |        | Днище   |        |
|                                                                | Перегиб              | Прогиб | Перегиб | Прогиб | Перегиб                      | Прогиб | Перегиб | Прогиб |
| Класс судна на момент выполнения расчета прочности: «М–ПР 2,5» |                      |        |         |        |                              |        |         |        |
| «Волгонефть-261»                                               | 1,264                | 1,255  | 1,308   | 1,416  | 1,043                        | 1,045  | 0,917   | 1,009  |
| «Волгонефть-254»                                               | 1,002                | 0,902  | 1,087   | 1,248  | 0,744                        | 0,621  | 0,849   | 0,920  |

<sup>1</sup> Правила освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (в ред., утв. Приказом № 78п; введ. в действ. с 07.11.2016 в ред. изв. № 32п. от 02.06.2025. С. 102.

<sup>2</sup> Класс «О–ПР» не принимается к расчету, так как он ниже анализируемого района водного бассейна.

Таблица 2  
(Окончание)

| Класс судна на момент выполнения расчета прочности: «М-СП 3,5» |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| «Волгонефть-250»                                               | 1,131 | 1,036 | 1,302 | 1,386 | 1,031 | 1,033 | 0,916 | 1,010 |
| «Волгонефть-251»                                               | 1,182 | 1,134 | 1,293 | 1,394 | 1,037 | 1,041 | 0,911 | 1,006 |
| «Волгонефть-259»                                               | 1,247 | 1,221 | 1,413 | 1,512 | 1,029 | 1,032 | 0,905 | 1,000 |
| «Волгонефть-266»                                               | 1,560 | 1,990 | 1,580 | 2,05  | 1,37  | 1,87  | 1,28  | 2,08  |
| «Волгонефть-267»                                               | 1,269 | 1,248 | 1,425 | 1,519 | 0,818 | 0,713 | 0,915 | 0,990 |

Несмотря на то, что анализируемые суда — однотипные, имеются различия в конструкции как на момент их постройки, так и после модернизации, касающиеся изменения параметров грузовых танков, а также отличия в инструкциях по погрузке-выгрузке. Более точно судить об уровне общей прочности судна в эксплуатации можно только после сопоставления фактического значения коэффициента запаса прочности со значением, регламентированным Правилами РКО. Условие обеспечения общей прочности:

$$k_{\text{факт}} = \frac{M_{\text{пр.экс}}}{|M_p|} = \frac{W_{\text{пр.экс}} \cdot \sigma_{\text{опт}} \cdot 10^3}{|M_p|} \geq K_{\text{годн}}, \quad (3)$$

где  $k_{\text{факт}}$  — фактическое значение коэффициента запаса общей прочности, рассчитанное для судна в эксплуатации с учетом имеющихся износов и остаточных деформаций.

В табл. 3 приведены коэффициенты запаса общей прочности для т/х «Волгонефть-254», наиболее схожего по характеристикам и классу эксплуатации с судами, потерпевшими аварию, и для судов типа «Волгонефть» с классом РКО «М-СП», предусматривающих большие нагрузки от перевозимого груза и иные инструкции по погрузке-выгрузке, в частности для т/х «Волгонефть-267».

Таблица 3

**Коэффициенты запаса прочности корпуса т/х «Волгонефть-254» и т/х «Волгонефть-267»**

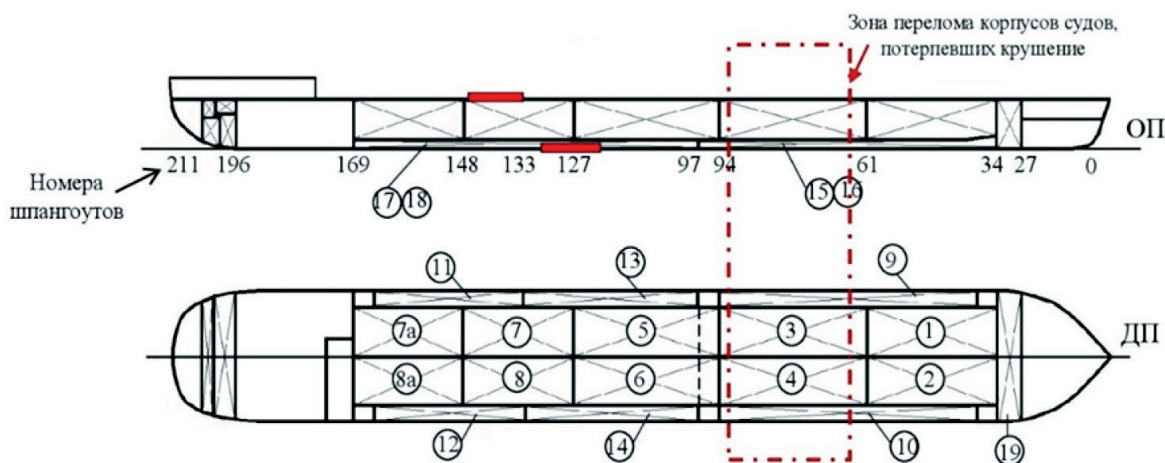
| Коэффициенты запаса для корпуса<br>в средней части |        |         |        | Коэффициенты запаса для корпуса<br>в районе шп.170 |        |         |        | K <sub>годн</sub><br>класс<br>«М-ПР» |
|----------------------------------------------------|--------|---------|--------|----------------------------------------------------|--------|---------|--------|--------------------------------------|
| Палуба                                             |        | Днище   |        | Палуба                                             |        | Днище   |        |                                      |
| Перегиб                                            | Прогиб | Перегиб | Прогиб | Перегиб                                            | Прогиб | Перегиб | Прогиб |                                      |
| т/х «Волгонефть-254»                               |        |         |        |                                                    |        |         |        |                                      |
| 1,293                                              | 1,768  | 1,262   | 2,201  | 1,340                                              | 2,321  | 1,375   | 3,096  | 1,26                                 |
| т/х «Волгонефть-267»                               |        |         |        |                                                    |        |         |        |                                      |
| 1,59                                               | 1,95   | 1,59    | 2,05   | 1,277                                              | 1,63   | 1,29    | 2,04   | 1,27                                 |

Фактически модернизированные суда типа «Волгонефть» имеют достаточный запас общей прочности и при наличии проведения качественных дефектации и ремонта могут безопасно эксплуатироваться на внутренних водных путях. Как отмечалось ранее, для судов внутреннего плавания с большой длиной наиболее опасным сечением являются районы перехода от стали повышенной прочности к стали обычной прочности с  $R_{\text{сн}} = 235$  МПа как для танкеров, так и для сухогрузных судов. Это районы от коффердама до машинного отделения. Тем не менее практика расчетов прочности показывает, что наиболее вероятными районами перелома могут служить также некоторые сечения средней части корпуса судна, тогда как сечение по конструкции более ослабленное и изготовленное из стали обыкновенной прочности может не представлять опасности с точки зрения потери общей прочности в силу того, что на данный район корпуса действуют меньшие по абсолютному значению суммарные изгибающие моменты  $|M_p|$ .

Как показали расчеты прочности т/х «Волгонефть-254» (наиболее близкого по конструкции с судами потерпевшими аварию), опасное с точки зрения перелома корпуса сечение расположено в районе грузовых танков (рис. 1). Перелом судов, потерпевших крушение в Керченском проливе,

также произошел в районе расположения грузовых танков. У т/х «Волгонефть-254» фактические значения коэффициентов запаса прочности близки к предельному для класса эксплуатации «М-ПР 2,5» значению для крайней связи «днище» в состоянии нагрузки «перегиб», что соответствует сжатию на вершине волны.

#### Разрез по ДП



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7a, 8a — грузовые танки

9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 — балластные отсеки

— наиболее опасные сечения палубы и днища т/х «Волгонефть-254»

Рис. 1. Расположение сечений т/х «Волгонефть-254», наиболее опасных с точки зрения вероятности возникновения перелома корпуса

Изображения корпуса т/х «Волгонефть-239» после посадки на мель (рис. 2) также свидетельствует о том, что произошло сжатие и слом днища, а также разрушение палубного настила при его растяжении.

а)



б)



Рис. 2. Состояние корпусных конструкций в зоне перелома корпуса т/х «Волгонефть-239»: а — вид перелома со стороны борта; б — вид разрушения палубного настила (фото с сайта [www.crimea-news.com](http://www.crimea-news.com))

Наряду с установленными Правилами РКО нагрузками от общего изгиба:  $M_p$  — расчетного изгибающего момента, определяемого суммированием момента на тихой воде и дополнительного волнового изгибающего момента, снижению общей прочности корпуса немодернизированных судов типа «Волгонефть» способствует наличие в корпусе общих остаточных деформаций а именно общего остаточного перегиба (рис. 3).

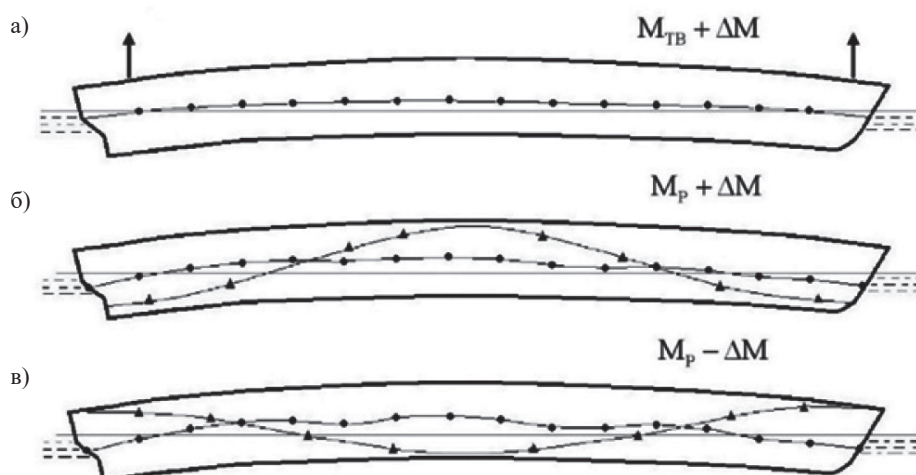


Рис. 3. Влияние общих остаточных деформаций (общего остаточного перегиба) на расчетный изгибающий момент: а — корпус имеет перегиб, судно на тихой воде; б — корпус имеет перегиб, судно на вершине волны; в — корпус имеет перегиб, судно на подошве волны.

Условные обозначения:

$M_{TB}$  — изгибающий момент на тихой воде;  
 $\Delta M$  — изменение (прирост) момента на тихой воде за счет наличия в корпусе судна общего остаточного перегиба;  $M_{доп.в}$  — дополнительный волновой изгибающий момент;  
 $M_p$  — расчетный изгибающий момент, определяемый алгебраическим суммированием момента на тихой воде ( $M_{TB}$ ) и дополнительного волнового изгибающего момента ( $M_{доп.в}$ )

Корпуса т/х «Волгонефть-212» и т/х «Волгонефть-239» имели общий остаточный перегиб (когда палуба растянута, а днища сжато), что явилось дополнительным фактором увеличения суммарного изгибающего момента по сравнению с его расчетным значением, установленным Правилами РКО.

Перспективы дальнейшей эксплуатации модернизированных танкеров типа «Волгонефть». Как показал выполненный ранее анализ, фактический возраст судна не всегда является фактором аварии, связанной с потерей общей прочности корпуса. Так, танкеры, прошедшие модернизацию корпуса, обладают достаточным запасом общей прочности, позволяющим их безопасную эксплуатацию в районах и сезонах, предусмотренных классом, указанном в классификационном свидетельстве («М-ПР 2,5» или «М-СП 3,5»). Суда, находящиеся в собственности или ведении ответственных судоходных компаний, регулярно проходят очередные освидетельствования и качественный ремонт.

Для обеспечения общей прочности данных судов можно увеличить запас прочности при очередном их ремонте путем установки полос подкрепления на наиболее ослабленную крайнюю связь: настил палубы или обшивку днища (в зависимости от того, какая из крайних связей является наиболее ослабленной).

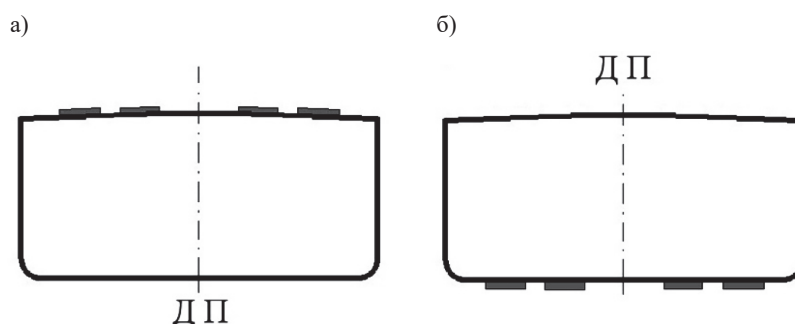


Рис. 4. Схема установки полос подкрепления общей прочности: а — на настиле палубы; б — на обшивке днища



Ремонт корпуса судна подкреплением общей прочности крайних связей является эффективным и экономичным. Решать вопрос об установке подкреплений корпусных конструкций необходимо индивидуально по каждому судну с учетом его класса эксплуатации и фактического технического состояния.

Перед установкой подкреплений следует проанализировать фактическое техническое состояние корпуса конкретного судна с учетом класса дальнейшей эксплуатации (сохранение класса либо его понижение). В частности, при подкреплении обшивки днища т/х «Волгонефть-254» установкой четырех полос размерами  $20 \times 300$  мм можно увеличить коэффициенты запаса общей прочности. Так, для обшивки днища в наиболее ослабленном сечении средней части корпуса в состоянии перегиба коэффициент запаса при подкреплении увеличится с 1,262 до 1,277.

### Выводы (Conclusions)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Надежная и безопасная модернизированных корпусов танкеров типа «Волгонефть» возможна.
2. О фактическом техническом состоянии корпуса судна в эксплуатации с обозначенным классом следует судить в каждом отдельном случае, исходя из расчетов общей прочности после качественной дефектации и ремонта.
3. В целях гарантии безопасности эксплуатации данных судов на внутренних водных путях следует установить подкрепления настила палубы или обшивки днища, в зависимости от того, какая крайняя связь является наиболее ослабленной.

### Благодарности

*Авторы статьи отдают дань уважения и выражают благодарность ушедшим из жизни: д-ру техн. наук, проф. В. Б. Чистову и канд. техн. наук, доц. заведующему лабораторией ремонта корпусов судов А. А. Вышеславцеву.*

*Профессор В. Б. Чистов — человек энциклопедических знаний, «прочнист от бога», являлся генератором оригинальных идей по расчетам прочности корпусов судов и разработке оптимальных методов их ремонта.*

*Доцент А. А. Вышеславцев благодаря своей энергии осуществлял контакты с судовладельцами и инспекциями классификационных обществ (РКО и РМРС), обеспечивал регулярную работу лаборатории. За период 1996–2024 гг. было выполнено более 200 работ по хозяйственным договорам.*

*Трудно переоценить вклад В. Б. Чистова и А. А. Вышеславцева в обеспечение надежной и безопасной эксплуатации судов.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Оптимальная дефектация корпусов судов речного флота / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 915–930. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930. — EDN CJMFUD.
2. Красюк А. Б. Надежность элементов корпусов судов речного флота / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов, В. Г. Никифоров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1041–1053. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053. — EDN QQQDZW.
3. Барышников С. О. Ремонт и надежность корпусов судов речного флота / С. О. Барышников, Т. О. Карпина, В. Б. Чистов // Судостроение. — 2021. — № 1(854). — С. 10–13. DOI: 10.54068/00394580\_2021\_1\_10. — EDN QUAEVB.
4. Красюк А. Б. Методологические основы дефектации стальных корпусов судов / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 87–93. — EDN QCNRHJ.



5. Барышников С. О. Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 124–128. — EDN NCDTCF.
6. Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533. — EDN TVJHNJ.
7. Карклина Т. О. Повышение точности измерения остаточного перегиба корпуса судна / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4(32). — С. 109–118. — EDN UDJUUR.
8. Красюк А. Б. Влияние погрешностей в определении остаточных толщин элементов корпусных конструкций на общую прочность корпуса судна / А. Б. Красюк // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2(21). — С. 70–77. — EDN RUOIAZ.
9. Барышников С. О. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95. — EDN TVZRCH.
10. Барышников С. О. Влияние местных остаточных деформаций на надежность корпусов судов / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 403–416. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-403-416. — EDN YWDUSM.
11. Кочнев Ю. А. Разработка математической модели и алгоритма определения последовательности дефектации корпуса судна / Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева, О. К. Зяблов // Научные проблемы водного транспорта. — 2024. — № 78. — С. 66–75. DOI: 10.37890/jwt.vi78.455. — EDN TYQPWG.
12. Кочнев Ю. А. Механизация инструментального контроля технического состояния корпусов судов / Ю. А. Кочнев, О. К. Зяблов // Транспорт. Горизонты развития: Труды 1-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород — Новосибирск, 25–28 мая 2021 года. — Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 2021. — С. 48. — EDN SDSPIE.
13. Алешин Н. П. Мониторинг технического состояния корпусов судов с использованием телеуправляемого подводного аппарата / Н. П. Алешин, М. В. Григорьев, В. В. Вельтищев [и др.] // В мире неразрушающего контроля. — 2015. — Т. 18. — № 3. — С. 12–15. — EDN UDJSNB.
14. Кашина В. В. Перспективные направления корректировки процессов дефектации корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания / В. В. Кашина, Е. Г. Бурмистров // Судостроение. — 2024. — № 3(874). — С. 36–45. — EDN LXSLTS.
15. Патент № 2741671 Российская Федерация, МПК В63В 79/30, В63В 79/00, В63В 43/00. Способ контроля состояния наружной обшивки корпуса судна / П. Е. Бураковский, Е. П. Бураковский, А. В. Мыслик; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет». — № 2019137061; заявл. 18.11.2019; опубл. 28.01.2021. — EDN OZKXJZ.
16. Петрова Н. Е. Изменение технического состояния судна в результате износа корпусных конструкций / Н. Е. Петрова, Ж. В. Кумова, А. Л. Петров // Транспортное дело России. — 2025. — № 4. — С. 261–264. — EDN OVWHXW.
17. Корецкий С. В. Влияние на экологию разлива нефтепродуктов с танкеров «Волгонефть-12» и «Волгонефть-239» в акватории Краснодарского края / С. В. Корецкий // Актуальные исследования. — 2025. — № 21–2(256). — С. 21–23. — EDN MLSIPO.
18. Комарова Е. Е. Влияние разлива мазута в Черном море на туристическую деятельность в Краснодарском крае / Е. Е. Комарова // Культурный код и креативные индустрии: тренды, методология, эффективные практики: Материалы III Международной научно-практической конференции, Омск, 20–21 апреля 2025 года. — Омск: Омский государственный технический университет, 2025. — С. 191–194. — EDN WFJNIQ.

## REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., A. B. Krasnyuk and V. B. Chistov. “Optimal fault detection of river ship hulls.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 14.6 (2022): 915–930. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930.

2. Krasnyuk, A. B., V. B. Chistov and V. G. Nikiforov. "Reliability of river fleet vessels hull elements." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1041–1053. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053.
3. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina and V. B. Chistov. "Repair and reliability of river service ships." *Shipbuilding* 1(854) (2021): 10–13. DOI: 10.54068/00394580\_2021\_1\_10.
4. Krasnyuk, A. B. and V. B. Chistov. "Metodologicheskie osnovy defektatsii stal'nykh korpusov sudov." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 3 (2013): 87–93.
5. Baryshnikov, S. O. and T. O. Karklina. "Total residual strain ship hulls." *Vestnik INZhEKONa. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 8 (2010): 124–128.
6. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina and V. B. Chistov. "Reliability of ships hulls with overall residual deformations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
7. Karklina, T. O., A. V. Pavlov and V. B. Chistov. "Enhance the accuracy of residual deflection hull." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 109–118.
8. Krasnyuk, A. B. "Vliyanie pogreshnostey v opredelenii ostatochnykh tolschin elementov korpusnykh konstruktiv na obschuyu prochnost' korpusa sudna." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 70–77.
9. Baryshnikov, S. O., A. B. Krasnyuk and V. B. Chistov. "A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.
10. Baryshnikov, S. O., A. B. Krasnyuk and V. B. Chistov. "The influence of local residual deformations on the ships hulls reliability." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 403–416. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-403-416.
11. Kochnev, Yu. A., I. B. Kochneva and O. K. Zyablov. "Development of a mathematical model and algorithm for the sequence of fault detection of the ship's hull." *Russian Journal Of Water Transport* 78 (2024): 66–75. DOI: 10.37890/jwt.vi78.455.
12. Kochnev, Yu. A. and O. K. Zyablov. "Mechanization of instrumental monitoring of the technical condition of ship hulls." *Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 1-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhniy Novgorod — Novosibirsk, 25–28 maya 2021 goda*. Nizhniy Novgorod: Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta (FGBOU VO "VGUVT"), 2021: 48–48.
13. Aleshin, N. P., M. V. Grigor'ev and V. V. Vel'tischev et al. "Ship hull diagnostics with the use of remotely operated underwater vehicle." *V mire nerazrushayushchego kontrolya* 18.3 (2015): 12–15.
14. Kashina, V. V. and E. G. Burmistrov. "Promising directions for correcting the processes of hull deflection of inland and mixes river-sea navigation vessels." *Shipbuilding* 3(874) (2024): 36–45.
15. Burakovskiy, P. E., E. P. Burakovskiy and A. V. Mysnik. RU 2 741 671 C1, B 63 B 79/30, B 63 B 79/00, B 63 B 43/00. Sposob kontrolya sostoyaniya naruzhnoy obshivki korpusa sudna. Russian Federation, assignee. Publ. January 28, 2021.
16. Petrova, N. E., Zh. V. Kumova and A. L. Petrov. "Changes in the technical condition of the vessel as a result of wear of hull structures." *Transport Business Of Russia* 4 (2025): 261–264.
17. Koretskiy, S. V. "Environmental impact of oil product spills from tankers «volgoneft-12» and «volgoneft-239» in the krasnodar territory." *Aktual'nye issledovaniya* 21–2(256) (2025): 21–23.
18. Komarova, E. E. "Vliyanie razliva mazuta v Chernom more na turisticheskuyu deyatel'nost' v Krasnodarskom krae." *Kul'turnyy kod i kreativnye industrii: trendy, metodologiya, effektivnye praktiki: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Omsk, 20–21 aprelya 2025 goda*. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2025: 191–194.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Красюк Алла Борисовна** —  
кандидат технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: krasnyuk\_a\_b@mail.ru, kaf\_mnt@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Krasiuk, Alla. B.** —  
PhD of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: krasnyuk\_a\_b@mail.ru, kaf\_mnt@gumrf.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)

**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)

*Статья поступила в редакцию 01 июля 2025 г.  
Received: July 1, 2025.*

# ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-558-566

EDN MWRNHS

## EFFECT OF A HIGH-SPEED CATAMARAN TRIM AND DRAFT ON THE VALUE OF RESIDUAL RESISTANCE COEFFICIENT

**K. M. Ushakov<sup>1,2</sup>, Yu. V. Yatsuk<sup>1</sup>, A. B. Pisarenko<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> — Forss Tekhnologii, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

*The paper studies changes in water resistance to the motion of a high-speed passenger catamaran due to changes in trim and draft. The trim can vary within small limits both during design by changing the arrangement of masses and during operation due to ballasting or the movement of passengers. The draft can also change during the design process due to changes in equipment or inaccuracies in determining the masses, and during project modernization — for example, for operation in another area. During operation, the draft depends on the vessel's load. Through such variations, it is possible to provide the vessel with better seaworthiness and operational qualities. One way to improve such qualities can be to reduce water resistance to the vessel's motion, as this can reduce the load on the main engines, decrease fuel consumption, and increase achievable speed. This paper presents the results of a study of the vessel's trim parameters on the residual resistance coefficient. The tests were carried out in the towing tank at the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. The paper presents experimentally obtained curves of residual resistance coefficients for four specified values of static trim. The displacement was kept constant and corresponded to the full load of the vessel, and the model's center of gravity position was changed by transferring ballast. The studies were performed for the case of a landing with maximum operational trim by the stern (the static trim angle was  $-0.7$  degrees, the running trim angle at maximum speed was about  $-2$  degrees), for the case in which the running trim was close to zero (the static trim angle was  $1.4$  degrees), and for two intermediate variants. The tests were conducted in calm deep water for Froude numbers from  $0.41$  to  $0.82$ , corresponding to full-scale vessel speeds from  $14$  to  $28$  knots. It was shown that the effect of trim on resistance depends on speed. At Froude numbers of  $0.40$  to  $0.55$  (full-scale vessel speed of  $14$ – $19$  knots), trim by the stern increases resistance. At higher speeds, with increasing trim, the value of the residual resistance coefficient decreases, while with increasing speed, the positive effect of trim also increases. The effect of increasing draft on the value of residual resistance with constant trim is also estimated. At low speeds, increasing draft increases the residual resistance coefficient; with increasing draft, this effect decreases. Thus, some trim by the stern allows reducing the value of towing resistance when moving at high speeds in calm deep water.*

*Keywords: high-speed vessel, multihull, catamaran, water resistance, model, towing test, rest resistance, trim.*

### For citation:

Ushakov, Konstantin M., Yu. V. Yatsuk and A. B. Pisarenko. "Effect of a high-speed catamaran trim and draft on the value of residual resistance coefficient." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 558–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-558-566.

УДК 629.12:532.583.4

## ВЛИЯНИЕ ДИФФЕРЕНТА И ОСАДКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КАТАМАРАНА НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ОСТАТОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

**К. М. Ушаков<sup>1,2</sup>, Ю. В. Яцук<sup>1</sup>, А. Б. Писаренко<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> — ООО «Форс технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе исследованы изменения сопротивления воды движению скоростного пассажирского катамарана, возникающие вследствие изменения дифферента и осадки. Отмечается, что дифферент может варьироваться в небольших пределах как при проектировании с помощью изменения расположения масс по длине, так и при эксплуатации вследствие приема балласта или перемещения пассажиров; осадка также может измениться в процессе проектирования вследствие изменения условий поставки или неточностей определения масс при модернизации проекта, например, для эксплуатации в другом районе. С помощью изменения дифферента можно обеспечить судну лучшие мореходные и эксплуатационные качества. Подчеркивается, что одним из путей улучшения таких качеств может служить снижение сопротивления воды движению судна, поскольку при этом может уменьшиться нагрузка на главные двигатели, снизиться расход топлива, а достижимая скорость увеличится. В работе приведены результаты исследования влияния параметров посадки судна на коэффициент остаточного сопротивления. Испытания проводились в опытовом бассейне Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Приведены экспериментально полученные кривые коэффициентов остаточного сопротивления для четырех заданных значений статического дифферента. При этом водоизмещение сохранялось постоянным и соответствующим полной загрузке судна, менялась абсцисса центра тяжести модели с помощью перенесения балласта. Исследования выполнялись для случая посадки с максимальным эксплуатационным дифферентом на корму (угол статического дифферента  $-0,7^\circ$ , угол ходового дифферента на максимальной скорости около  $-2^\circ$ ) для случая, при котором ходовой дифферент был близок к нулю (угол статического дифферента  $1,4^\circ$ ), а также для двух промежуточных вариантов. Испытания проводились в условиях тихой глубокой воды для чисел Фруда от 0,41 до 0,82, что соответствует скорости натурного судна от 14 до 28 уз. Показано, что влияние дифферента на сопротивление зависит от скорости движения — при значении числа Фруда 0,40–0,55 (скорость натурного судна 14–19 уз) дифферент на корму увеличивает сопротивление. При более высокой скорости с увеличением дифферента значение коэффициента остаточного сопротивления снижается, при этом с увеличением скорости положительное влияние дифферента увеличивается. Выполнена оценка влияния увеличения осадки на величину остаточного сопротивления при неизменном дифференте. На малых скоростях с увеличением осадки увеличивается коэффициент остаточного сопротивления. Таким образом, сделан вывод о том, что дифферент на корму позволяет снизить величину буксировочного сопротивления при движении с большими скоростями в условиях тихой глубокой воды.

Ключевые слова: высокоскоростное судно, катамаран, ходкость, сопротивление, модельные испытания, остаточное сопротивление, посадка, дифферент.

**Для цитирования:**

Ушаков К. М. Влияние дифферента и осадки высокоскоростного катамарана на величину коэффициента остаточного сопротивления / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук, А. Б. Писаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 558–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-558-566. — EDN MWRNHS.

## Введение (Introduction)

Посадка судна может изменяться во время эксплуатации вследствие изменения загрузки и расходования запасов, а для пассажирских судов — также вследствие перемещения пассажиров. Это особенно актуально для малых судов [1], у которых относительный вес пассажиров больше. В процессе проектирования расчетная посадка судна также может претерпевать значительные изменения вследствие корректировки условий поставки оборудования, изменений технического задания и других факторов. То же самое возможно при модернизации существующего проекта. При этом корректировать осадку и дифферент существующего судна с целью улучшения мореходных качеств можно путем размещения балласта. Изменение ходового дифферента высокоскоростных судов возможно также с помощью установки транцевых плит или интерцепторов. В работах [1]–[5] и других публикациях показано, что влияние дифферента на сопротивление воды движению зависит от типа судна, формы обводов, относительной скорости движения и др.

Целью данной работы является определение характера влияния дифферента на величину коэффициента остаточного сопротивления модели высокоскоростного пассажирского катамарана.



### Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование было выполнено с помощью испытаний малой модели в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Длина бассейна — 120 м, ширина — 6,0 м, глубина — 3,0 м. Бассейн оборудован обитаемой буксировочной тележкой и комплектом аппаратуры.

Длина модели по ватерлинии  $L$  составила 2,40 м. Обводы судна характерны для современных скоростных водоизмещающих катамаранов. Ватерлинии в носу практически прямые, носовое заострение удлиненное, в кормовой части каждого корпуса расположен полутуннель для размещения движительно-рулевого комплекса. Модель выполнена композитной из пенополистирола, фанеры, эпоксидных смолы и гелькоута. Поверхность выровнена, окрашена и отполирована. В соответствии с требованиями ИТТС [6], для высокоскоростных судов искусственная турбулизация потока не применялась. Фотография модели приведена на рис. 1.



Рис. 1. Модель судна на стапеле

Испытания проводились в диапазоне значений числа Фруда 0,41–0,82 по длине  $Fr = V / \sqrt{gL}$ , где  $V$  — скорость движения модели, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения;  $L$  — длина модели по ватерлинии, м.

Исследования выполнялись для следующих вариантов посадки:

- с максимальным эксплуатационным дифферентом на корму (угол статического дифферента  $-0,7^\circ$ , угол ходового дифферента на максимальной скорости около  $-2^\circ$ );
- с близким к нулю ходовым дифферентом (угол статического дифферента  $1,4^\circ$ );
- с близким к нулю статическим дифферентом (промежуточный вариант — с углом статического дифферента  $0,7^\circ$ ).

Осадка модели при этом составила 80 мм. Дополнительно были проведены испытания модели с увеличенной до 100 мм осадкой при нулевом статическом дифференте. Во время испытаний штатными датчиками измерялись дифферент, скорость движения и буксировочное сопротивление. Для анализа полученные величины приводились к безразмерному виду. Всего измерения были выполнены для 35 вариантов движения (пять вариантов посадки, по семь скоростей в каждом).

### Результаты (Results)

Буксировочное сопротивление обрабатывалось по методу Фруда. Последовательность расчетов:

1. Вычисление коэффициента полного сопротивления модели ( $C_M$ ):

$$C_M = \frac{2R_T}{\rho V^2 S_M},$$

где  $R_T$  — измеренная сила сопротивления воды движению модели, Н;

$S_M$  — площадь смоченной поверхности модели,  $m^2$ ;

$V$  — скорость буксировки модели, м/с;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  — массовая плотность воды в опытовом бассейне.

2. Определение числа Фруда (относительной скорости):

$$Fr = V / \sqrt{gL},$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;

$V$  — скорость буксировки модели, м/с;

$L$  — длина модели, м.

3. Определение числа Рейнольдса:

$$Re_M = VL / \nu_M,$$

где  $\nu_M = 1,092 \cdot 10^{-6}$  — кинематическая вязкость воды в опытовом бассейне во время проведения испытаний модели, м/с<sup>2</sup>.

4. Вычисление коэффициента сопротивления эквивалентной гладкой пластины  $C_{F_{0.M}}$ .

5. Коэффициент остаточного сопротивления корпуса  $C_R$ ,

$$C_R = C_M - C_{F_{0.M}}.$$

ИТТС [6] рекомендует для высокоскоростных судов выполнять пересчет с учетом ходового изменения площади смоченной поверхности, т. е. вычислять коэффициент остаточного сопротивления по формуле  $C_{R1} = C_M - C_{F_{0.M}} \cdot S_{x.M} / S_M$ , где  $S_{x.M}$  — площадь смоченной поверхности на ходу с учетом изменения всплытия и дифферента. Такой подход, с одной стороны, более корректен, поскольку при его использовании сопротивление трения вычисляется только для фактически погруженной в воду поверхности, а с другой стороны, обработанные таким образом данные сложнее сравнивать с результатами других испытаний. На рис. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных обоими способами. Видно, что принципиально характер кривых не меняется. В связи с этим сравнение кривых остаточного сопротивления при разных осадках, приведенное на рис. 3, выполнялось без учета динамического изменения погруженной площади.

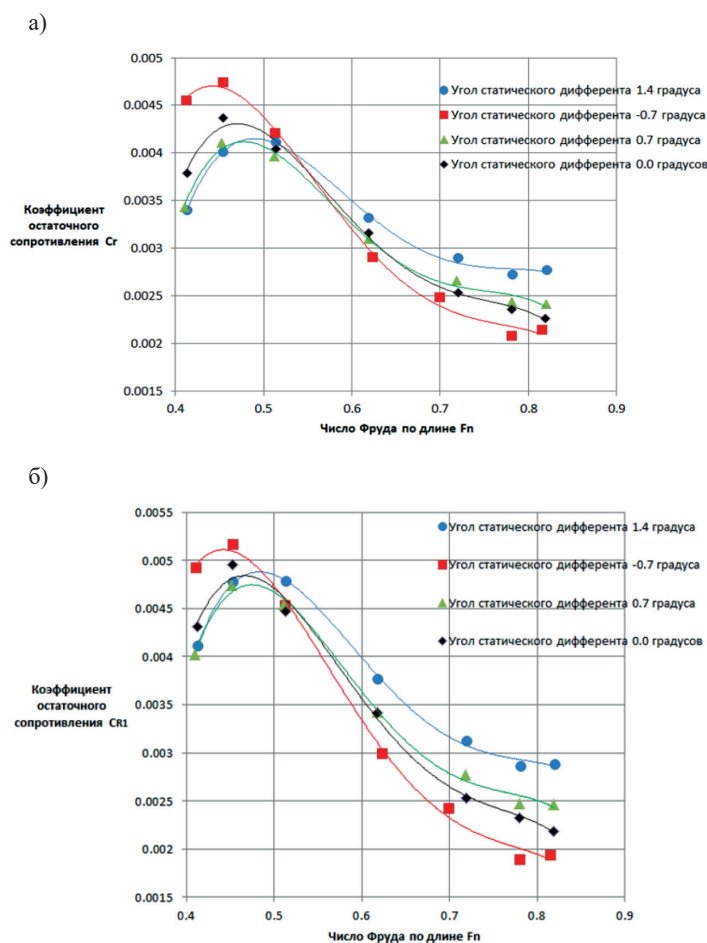


Рис. 2. Зависимости коэффициентов остаточного сопротивления модели: а — без учета ходового изменения смоченной поверхности; б — с учетом ходового изменения смоченной поверхности  
Условные обозначения:

точками показаны экспериментальные значения, сплошными линиями — аппроксимации

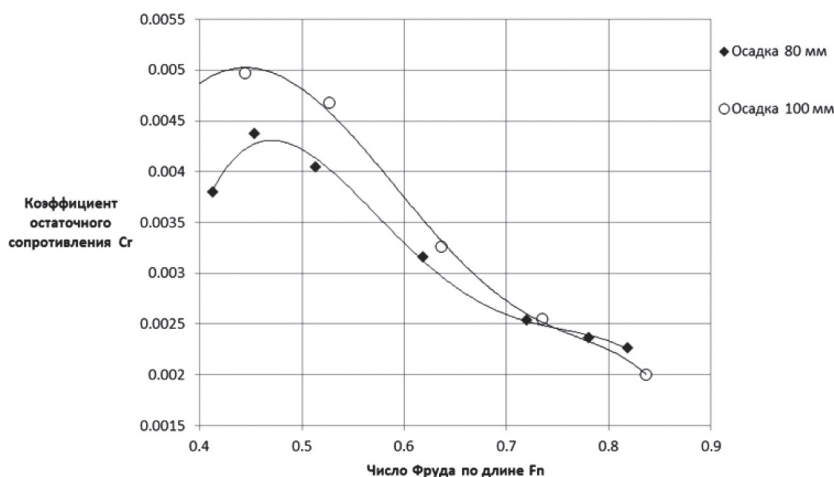


Рис. 3. Зависимости коэффициентов остаточного сопротивления модели от числа Фруда для двух вариантов осадки

Условные обозначения:

точками показаны экспериментальные значения, сплошными линиями — аппроксимации

Углы ходового дифферента измерялись датчиком резистивного типа и могут быть перенесены на натурное судно или выполнено их прямое сравнение с другими данными (без пересчета). Результаты измерений приведены на рис. 4.

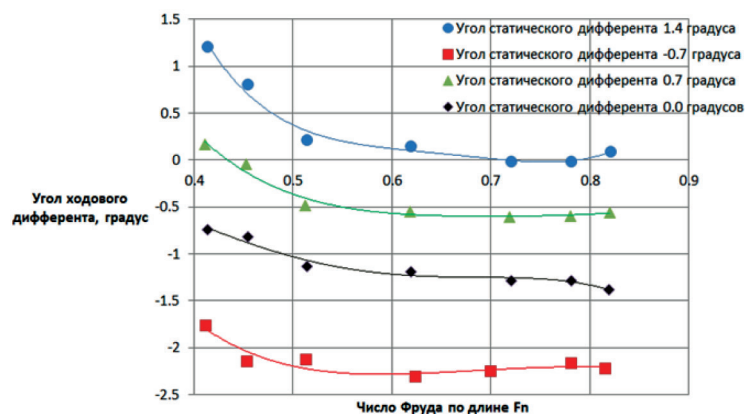


Рис. 4. Зависимости угла ходового дифферента от числа Фруда для различных вариантов статического дифферента

Условные обозначения:

точками показаны экспериментальные значения, сплошными линиями — аппроксимации

Фотография модели во время испытаний показана на рис. 5.

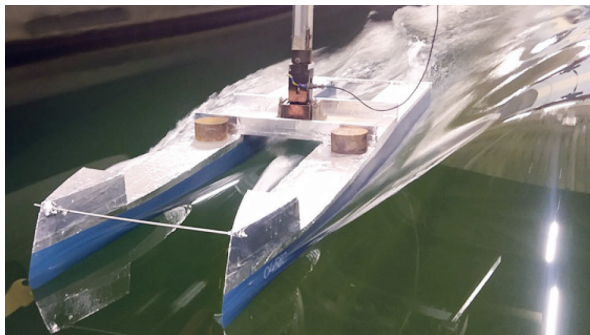


Рис. 5. Фотография модели во время проведения испытаний (угол ходового дифферента  $0^\circ$ ,  $Fr = 0,82$ )

При изменении посадки модели длина по ватерлинии практически не менялась. В связи с этим числа Фруда всегда вычислялись при одной и той же длине  $L = 2,40$  м.

### Обсуждение (Discussion)

В практике проектирования и эксплуатации судов считается, что наилучшей с точки зрения ходовых качеств является посадка на ровный киль. При этом в статье [2] показано, что для судов, у которых дифферент зависит от скорости хода, оптимальной будет посадка на ровный киль при движении с расчетной скоростью. В работах [3] и [4] приведены результаты модельного и численного эксперимента по исследованию движения контейнеровоза KCS с различными дифферентами. Сопротивление воды при любом дифференте на корму оказалось выше, чем при посадке на ровный киль или на нос, при этом влияние дифферента зависит от скорости. К таким же выводам пришли авторы [5] применительно к движению в условиях мелководья, однако в данном исследовании во время проведения испытаний ходовой дифферент не измерялся. В работе [1] приведены результаты исследования влияния дифферента на сопротивление воды движению малого пассажирского судна. Для таких судов в диапазоне чисел Фруда 0,15–0,35 дифферент на нос оказывает отрицательное влияние, а дифферент на корму практически не оказывает влияния на величину коэффициента остаточного сопротивления.

Применительно к скоростным катамаранам также выполнялись исследования влияния посадки на сопротивление. Так, при исследовании сопротивления воды движению катамарана с упрощенными обводами [7] авторы определили, что при числах Фруда, превышающих 0,60, преимущество имеет вариант с дифферентом на корму. В статье [8] опубликованы результаты большого исследования параметров ходкости катамарана. В частности, приводятся результаты измерения сопротивления при движении с числом Фруда 0,602 и различных углах дифферента. Полученная авторами статьи [8] зависимость позволяет считать, что минимум сопротивления достигается при статическом дифференте около  $1,0^\circ$  на корму. В этой же работе приведены данные о совместном влиянии статического дифферента и выдвигателя транцевого интерцептора. Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что наилучшее сочетание выдвигателя интерцептора и статического дифферента дает такой же выигрыш по сопротивлению, как и оптимальный статический дифферент без интерцептора.

Таким образом, в некоторых случаях рациональное распределение масс по судну позволяет избежать установки дополнительных устройств для достижения высоких ходовых показателей. В то же время неудачная посадка на ровный киль может быть в определенной степени компенсирована установкой интерцепторов. В работе [9] с помощью физического эксперимента с малой моделью однокорпусного водоизмещающего судна показано, что выдвигатель интерцептора совместно с изменением статического дифферента может дать больший выигрыш в сопротивлении, чем отдельное изменение статического дифферента.

Анализ полученных в данном исследовании экспериментальных данных показал, что влияние дифферента на сопротивление скоростного катамарана зависит от скорости движения:

- при значении числа Фруда 0,40–0,52 дифферент на корму увеличивает сопротивление;
- при движении с числом Фруда 0,55 дифферент в пределах данного исследования не влияет на величину коэффициента остаточного сопротивления;
- при более высоких скоростях с увеличением дифферента на корму величина коэффициента остаточного сопротивления снижается, при этом с увеличением скорости положительное влияние дифферента также увеличивается.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученные данные хорошо согласуются с результатами других исследований.

Влияние изменения осадки на величину коэффициентов остаточного сопротивления зависит от скорости. При числах Фруда 0,40–0,70 увеличение осадки ведет к увеличению значений коэффициентов остаточного сопротивления, при этом разница между коэффициентами снижается. С дальнейшим увеличением числа Фруда до 0,72–0,85 увеличение осадки перестает влиять

на коэффициент остаточного сопротивления. В работе [7] для катамарана с упрощенными обводами увеличение осадки при любых числах Фруда из диапазона 0,30–0,80 приводит к увеличению значений коэффициента остаточного сопротивления. Эта разница может объясняться тем, что ходовые посадка и дифферент катамаранов с упрощенными обводами отличались от статических незначительно.

В работе [10] приводятся зависимости дифферента от скорости для катамаранов в случае движения с числами Фруда до 0,30, в целом согласующиеся с данным исследованием. Результаты измерений ходового дифферента показали, что в диапазоне числе Фруда 0,40–0,60 с увеличением скорости дифферент на корму увеличивается. При дальнейшем увеличении скорости дифферент близок к тому, чтобы сохраняться постоянным. Разница статического и ходового дифферента во всех случаях составила около  $-1,4^\circ$ .

### Заключение (Conclusion)

Приведенные данные показывают, что для высокоскоростных катамаранов некоторый дифферент на корму обеспечит снижение коэффициента остаточного сопротивления по сравнению с посадкой на ровный киль, что позволит увеличить достижимую скорость. Эти данные могут быть использованы при проектировании новых судов как при удифферентовке, так и при проектировании обводов путем придания судну конструктивного дифферента. Необходимо иметь в виду, что исследования выполнялись в условиях тихой глубокой воды без учета возможного влияния мелководья и морского волнения. Кроме того, дифферент может оказать влияние на коэффициенты взаимодействия движителей с корпусом. Эти аспекты планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков К. М. Влияние дифферента на сопротивление воды движению модели малого пассажирского судна / К. М. Ушаков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 723–729. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-723-729. — EDN EPXJER.
2. Чуреев Е. А. Исследование влияния строительного дифферента малых промысловых судов с большой полнотой корпуса на мореходные качества / Е. А. Чуреев, О. П. Орлов, И. В. Якута // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 4. — С. 30–38. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-30-38. — EDN VCVBAC.
3. Shivachev E. Trim Influence on Kriso Container Ship (KCS): An Experimental and Numerical Study / E. Shivachev, M. Khorasanchi, A. H. Day // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering — Volume 7A: Ocean Engineering 2017. — C. V07AT06A009. DOI: 10.1115/OMAE2017-61860.
4. Islam H. Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts / H. Islam, C. {G. Soares} // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 183. — Pp. 106–115. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.058.
5. Elsherbiny K. An Experimental Investigation of the Trim Effect on the Behaviour of a Containership in Shallow Water / K. Elsherbiny, T. Tezdogan, M. Kotb, A. Incecik, S. Day // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering — Volume 7B: Ocean Engineering 2019. — C. V07BT06A043. DOI: 10.1115/OMAE2019-95790.
6. ITTC Recommended procedures and guidelines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://itc.info/media/9876/0\\_0.pdf](https://itc.info/media/9876/0_0.pdf) (дата обращения: 19.07.2025).
7. Ушаков К. М. Исследование буксировочного сопротивления катамарана с упрощенными обводами / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук, А. Г. Саченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 127–137. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-127-137. — EDN NLJFNC.
8. Сверчков А. В. Экспериментальное исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на ходовые качества волнорассекающего катамарана / А. В. Сверчков, Г. Б. Крыжевнич, А. Ю. Правдин // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2–3(52). — С. 13–19. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.029. — EDN ALIETG.



9. Сверчков А. В. Применение транцевого интерцептора для снижения буксировочного сопротивления быстроходных водоизмещающих судов / А. В. Сверчков, М. В. Галушин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — № 4(402). — С. 85–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-85-100. — EDN ZRTGSB.

10. Корякова М. Н. Оценка изменения посадки большегрузного катамарана численными методами / М. Н. Корякова, С. В. Бушков, Е. Ю. Чебан // Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород – Новосибирск – Владивосток – Самара, 23–26 апреля 2024 года. — Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. — С. 117. — EDN ADDWCN.

## REFERENCES

1. Ushakov, K. M. “Trim influence on water resistance to movement of small passenger ship model.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.5 (2021): 723–729. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-723-729.

2. Chureev, E. A., O. P. Orlov and I. V. Yakuta. “Studying influence of designed trim in small fishing vessels with great hull fullness on their seaworthiness.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 4 (2019): 30–38. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-30-38.

3. Shivachev, E., M. Khorasanchi and A. H. Day. “Trim Influence on Kriso Container Ship (KCS): An Experimental and Numerical Study.” *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering — Volume 7A: Ocean Engineering* 2017: V07AT06A009. DOI: 10.1115/OMAE2017-61860.

4. Islam, H. and C. {G. Soares}. “Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts.” *Ocean Engineering* 183 (2019): 106–115. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.058.

5. Elsherbiny, K., S. Day, et al. “An Experimental Investigation of the Trim Effect on the Behaviour of a Containership in Shallow Water.” *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering — Volume 7B: Ocean Engineering* 2019: V07BT06A043. DOI: 10.1115/OMAE2019-95790.

6. ITTC Recommended procedures and guidelines Web. 19 July. 2025 <[https://itc.info/media/9876/0\\_0.pdf](https://itc.info/media/9876/0_0.pdf)>.

7. Ushakov, K. M., Yu. V. Yatsuk and A. G. Sachenko. “Investigation of the towing resistance of a catamaran with simplified hull forms.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 17.1 (2025): 127–137. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-127-137.

8. Sverchkov, A. V., G. B. Kryzhevich and A. Yu. Pravdin. “Experimental investigation of structural and operational factor effects on speed performance of wave cleaving catamarans.” *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 2–3(52) (2021): 13–19. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.029.

9. Sverchkov, A. V. and M. V. Galushin. “Transom interceptor for towing resistance reduction of fast displacement ships.” *Transactions Of The Krylov State Research Centre* 4(402) (2022): 85–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-85-100.

10. Koryakova, M. N., S. V. Bushkov and E. Yu. Cheban. “Estimation the change of the large cargo catamaran's draft and trim by numerical methods.” *Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 4-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhniy Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok-Samara, 23–26 aprelya 2024 goda*. Nizhniy Novgorod: Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta, 2024: 117.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ушаков Константин Михайлович** —  
доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Двинская, 5/7  
ведущий инженер-конструктор  
ООО «Форсс технологии»  
190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Бронницкая, 44/117, лит. А, пом. 1Н  
e-mail: [UshakovKM@gumrf.ru](mailto:UshakovKM@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ushakov, Konstantin M.** —  
associate professor,  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
Forss Tekhnologii, Ltd.  
lead design engineer,  
44/117 Bronnitskaya Str., St. Petersburg, 190013,  
Russian Federation  
e-mail: [UshakovKM@gumrf.ru](mailto:UshakovKM@gumrf.ru)

**Яцук Юрий Владимирович** —

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

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

e-mail: [YatsukUV@gumrf.ru](mailto:YatsukUV@gumrf.ru)

**Писаренко Анастасия Борисовна** —

старший преподаватель  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

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

e-mail: [kaf\\_shipbuilding@gumrf.ru](mailto:kaf_shipbuilding@gumrf.ru)

**Yatsuk, Yury V.** —

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

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

e-mail: [YatsukUV@gumrf.ru](mailto:YatsukUV@gumrf.ru)

**Pisarenko, Anastasia B.** —

senior lecturer  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping

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

e-mail: [kaf\\_shipbuilding@gumrf.ru](mailto:kaf_shipbuilding@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2025 г.*

*Received: July 23, 2025.*

## ANALYSIS OF THE STRUCTURAL AND HYDROSTATIC CHARACTERISTICS OF CONTAINER SHIPS IN THE CONTEXT OF THEIR CHANGES IN LONGITUDINAL WAVES

**R. S. Tsarik**

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

*This paper is devoted to the analysis of the structural and hydrostatic characteristics of container ships in the context of their changes in longitudinal waves. It is noted that the structural and hydrostatic characteristics of container ships have their own specifics, due, in particular, to the economic optimization of container transportation, and directly affect the behavior of the ship in waves. These specifics should be considered by navigators when calculating and monitoring stability during the voyage. It is emphasized that the hydrostatic characteristics of a ship in waves are constantly changing, and their consideration is a difficult task. Currently, no practical solution to this problem has been proposed. The passage of a wave along the hull of a ship assumes that different parts of it will have different draughts at different times. Based on this, this paper examines the variation and dependence of ship characteristics for different draughts. The waterline area and its completeness coefficients are considered as one of the most important parameters. To calculate them in waves, a technique is proposed, which consists in dividing the waterline into sections and determining the area of each section, taking into account its completeness coefficient, depending on the draught. Calculations performed using the characteristics of existing container ships of different tonnages have shown the dependencies and relations between such structural and hydrostatic characteristics of container ships as hull shape, relations between linear dimensions, draught, block coefficient and waterline area coefficient. It is noted that further research based on the results obtained in this work can form the basis for the development of a methodology for considering the parameters of a container ship in waves, suitable for use by navigators in practice. This will certainly contribute to improving the safety of operation of container ships.*

*Keywords: container ship, structural and hydrostatic characteristics, stability, waterplane area, completeness coefficient, waves, ship's rolling.*

### For citation:

Tsarik, Ruslan S. "Analysis of the structural and hydrostatic characteristics of container ships in the context of their changes in longitudinal waves" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 567–583. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-567-583.

**УДК 656.61.052**

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВ-КОНТЕЙНЕРОВОЗОВ В КОНТЕКСТЕ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ НА ПРОДОЛЬНОМ ВОЛНЕНИИ

**Р. С. Царик**

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»,  
Владивосток, Российская Федерация

*Выполнен анализ конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровозов в контексте их изменения на продольном волнении. Отмечается, что конструктивные и гидростатические характеристики контейнеровозов имеют свою специфику, обусловленную, в частности, экономической оптимизацией перевозки контейнеров, и оказывают непосредственное влияние на поведение судна на волнении. Отмечается, что эти особенности должны учитываться судоводителями при расчетах и контроле остойчивости в процессе выполнения рейса. Подчеркивается, что гидростатические характеристики судна на волнении постоянно изменяются, а их учет представляет собой сложную задачу. Решения этой задачи, пригодного для практического применения, в настоящее время нет. Прохождение волны вдоль корпуса судна предполагает, что различные его части в разное время будут иметь разную осадку. Исходя*

из этого в настоящей работе исследуется изменение и зависимость характеристик судна для разных осадок. В качестве важнейших параметров рассмотрена площадь ватерлинии и коэффициенты ее полноты. Для их расчета на волнении предложена методика, которая заключается в разбиении ватерлинии на секции и определении площади каждой из них с учетом ее коэффициента полноты, зависящего от осадки. Расчеты, выполненные с использованием характеристик действующих контейнеровозов разного тоннажа, показали зависимости и соотношения между такими конструктивными и гидростатическими характеристиками контейнеровозов, как обводы корпуса, соотношения линейных характеристик, осадка, коэффициент общей полноты и коэффициент полноты площади ватерлинии. Отмечается, что дальнейшие исследования на основе полученных в настоящей работе результатов, могут служить основой разработки методики учета параметров контейнеровоза на волнении, пригодной для применения судоводителями на практике, что, безусловно, будет способствовать повышению безопасности эксплуатации судов-контейнеровозов.

*Ключевые слова:* суда-контейнеровозы, конструктивные и гидростатические характеристики, остойчивость, площадь ватерлинии, коэффициент полноты, волнение, качка судна.

#### Для цитирования:

Царик Р. С. Анализ конструктивных и гидростатических характеристик судов-контейнеровозов в контексте их изменения на продольном волнении / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 567–583. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-567-583. — EDN PVESCI.

### Введение (Introduction)

Конструктивные и гидростатические характеристики судов-контейнеровозов определяют их остойчивость и поведение на волнении. Особенность этих характеристик заключается в специфических обводах корпуса и соотношении различных конструктивных параметров. Знание и правильная интерпретация конструктивных и гидростатических характеристик судна в значительной мере способствуют безопасной эксплуатации судна в целом и обеспечению безопасного плавания на волнении в частности.

Одним из наиболее значимых является вопрос обеспечения безопасности контейнеровозов на продольном волнении в контексте резонансной качки. Однако его исследования часто ограничиваются учетом соотношения длины судна и волны, и их влияния на остойчивость и параметры качки судна. Вместе с тем вопрос определения и последующего анализа влияния конструктивных и гидростатических характеристик судна на его поведение на волнении изучен недостаточно. Обычно такие исследования носят сугубо теоретический характер, выражающийся в применении достаточно сложного научного аппарата, что затрудняет использование полученных результатов судоводителями на практике.

Целью настоящей работы является анализ конструктивных и гидростатических характеристик судов-контейнеровозов, их особенностей и соотношений для последующего применения полученных данных при оценке и контроле судоводителями поведения судна на волнении. Для этого в работе были использованы характеристики действующих судов-контейнеровозов разного тоннажа, представленные в построечных чертежах, информации об остойчивости и других судовых документах, применяемых судоводителями на практике.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Терминологический аппарат, используемый для анализа характеристики судов.* Под конструктивными характеристиками подразумеваются все характеристики судна, в частности линейные размеры, и их соотношения, формирующие форму его корпуса и обуславливающие ее особенности. Под гидростатическими характеристиками подразумеваются характеристики судна, указанные в разделе «Гидростатические характеристики» в «Информации об остойчивости судна», в частности коэффициенты полноты. Эти характеристики очень тесно взаимосвязаны и в некоторых случаях могут относиться как к одному, так и к другому термину.

Полнота обводов корпуса судна характеризуется различными коэффициентами полноты, среди которых выделяют основные: коэффициент общей полноты, коэффициент полноты площади

ватерлинии и коэффициент полноты подводной части мидель-шпангоута. Корпус контейнеровоза имеет полную среднюю часть и острые носовую и кормовую части (рис. 1). Коэффициенты полноты корпуса контейнеровоза относительно малы по сравнению с такими типами судов, как танкер или балкер сопоставимого тоннажа. Это, в частности, обусловлено экономической оптимизацией контейнерных перевозок, когда форма корпуса судна проектируется таким образом, чтобы минимизировать сопротивление воды, обеспечив максимальную скорость судна при проектной мощности главного двигателя.

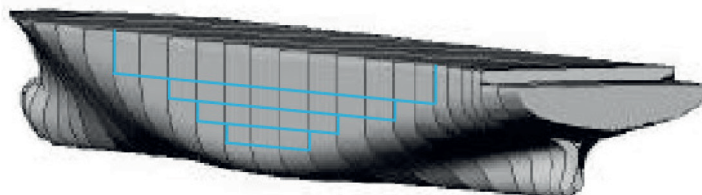


Рис. 1. Обводы корпуса контейнеровоза

С точки зрения обеспечения остойчивости судна на волнении одной из важнейших конструктивных характеристик является *площадь его ватерлинии*, характеризующаяся таким параметром, как *коэффициент полноты площади ватерлинии* ( $C_w$ ). Данный параметр приводится в гидростатических характеристиках судна в составе информации об остойчивости и зависит от осадки.

На примере контейнеровоза вместимостью 8110 ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент) на рис. 2 показано сечение судна по нескольким бортовым стрингерам.

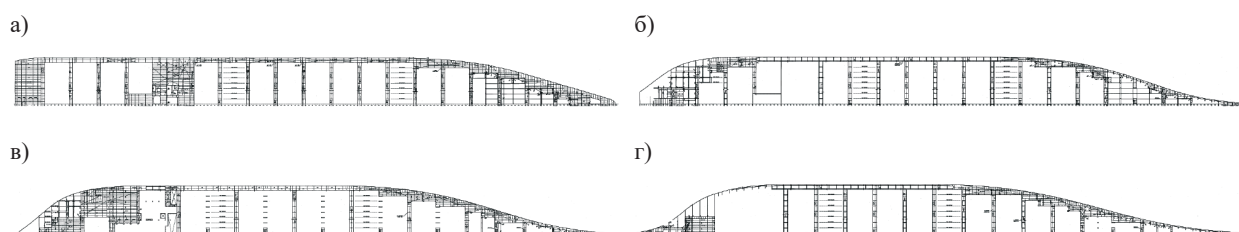


Рис. 2. План палуб контейнеровоза (8110 ДФЭ):

- a* — главная палуба (20,3 м от основной плоскости);
- б* — 11-й бортовой стрингер (15,2 м от основной плоскости);
- в* — 14-й бортовой стрингер (12,5 м от основной плоскости);
- г* — 17-й бортовой стрингер (10,0 м от основной плоскости)

Коэффициент  $C_w$  определяется отношением площади ватерлинии для данной осадки к площади прямоугольника со сторонами, равными длине судна между перпендикулярами  $L$  и ширине судна  $B$ . Площадь ватерлинии и, соответственно, коэффициент  $C_w$  уменьшаются с уменьшением осадки.

Поскольку площадь ватерлинии непосредственно зависит от ширины судна, следует учитывать влияние коэффициента полноты подводной части мидель-шпангоута ( $C_m$ ). В рамках настоящего исследования вызывает интерес не только коэффициент полноты  $C_m$ , но и коэффициенты полноты подводной части других шпангоутов судна ( $C_{m_i}$ ), определяемых отношением площади поперечного сечения по данному шпангоуту к площади прямоугольника со сторонами, равными ширине судна  $B$  и текущей осадке  $d$  (рис. 3).

Плавание судна на волнении предполагает постоянное изменение его гидростатических и гидродинамических характеристик [1]. Учет волнения на судне обычно осуществляется глазомерно и не отличается большой точностью. Разрабатываемые для оценки волнения технологии физические устройства на их основе и программное обеспечение еще не получили широкого практического применения [2]. На тихой воде определение площади ватерлинии не представляет сложности, поскольку осадка судна изменяется незначительно. В этом случае площадь ватерлинии можно выбирать из гидростатических таблиц по величине средней осадки с учетом дифферента судна.





Осадка судна на каждой станции для каждого положения вершины волны определяется по формуле

$$d(x_i, x_{Cj}) = d_m + 0,5h_w \cos\left(\frac{2\pi(x_i - x_{Cj})}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $d_m$  — средняя осадка судна на тихой воде, м;

$h_w$  — высота волны, м;

$\lambda$  — длина волны, м;

$x_i$  — абсцисса станции  $i$ , м;

$x_{Cj}$  — абсцисса гребня волны, м.

В процессе исследования характеристик судна на волнении возникает необходимость определения площади ватерлинии с учетом прохождения волны вдоль корпуса судна. Это предполагает определение расчетной площади ватерлинии ( $S'_{WP}$ ) как суммы площадей секций ( $S_{WP_i}$ ), заключенных между соседними станциями:

$$S'_{WP} = \sum_{i=1}^{i=20} S_{WP_i}. \quad (2)$$

Первоначально необходимо определить, какую долю общей площади занимает каждая секция ватерлинии на спокойной воде. При этом необходимо выделить следующие аспекты:

1. Площадь секции и ее доля от общей площади ватерлинии изменяется в зависимости от осадки.

2. Несколько центральных секций имеют одинаковую площадь для данной осадки, и, соответственно, одинаковую долю от общей площади. Эти секции в данной работе называются *полными секциями*.

3. Полные секции, полнота которых сохраняется для всех осадок судна, формируют цилиндрическую вставку корпуса судна.

Готовых данных о площади каждой секции не существует. Поэтому они могут быть получены только расчетным путем. С этой целью в настоящей работе вводится понятие *коэффициента полноты площади секции ватерлинии* ( $C_{w_i}$ ). Тогда площадь секции ватерлинии может быть рассчитана по формуле

$$S_{WP_i} = 0,05LBC_{w_i}, \quad (3)$$

причем  $C_{w_i}$  может выбираться как среднее значение, полученное в результате обработки гидростатических данных конкретного контейнеровоза или нескольких контейнеровозов. Коэффициент полноты площади полной секции, очевидно, равен единице.

Поскольку на волнении у каждой секции ватерлинии будет своя осадка, доля площади секции ватерлинии должна определяться в зависимости от площади ватерлинии судна для соответствующей осадки. Так, например, если с учетом прохождения волны вдоль корпуса судна секция 3 будет погружена в воду до осадки 15,0 м, то ее долю необходимо определять от ватерлинии судна, соответствующей 15,0 м. Доля соседней секции 4, погруженной до осадки 13 м, должна определяться от площади ватерлинии судна, соответствующей 13 м. Тогда формулу (2) можно записать следующим образом:

$$S'_{WP} = \sum_{i=1}^{i=20} S_{WP_{id}}, \quad (4)$$

где  $S_{WP_{id}}$  — площадь секции ватерлинии для данной осадки  $d$ .

Важным является определение количества полных секций для соответствующей осадки. Как показано на рис. 1, количество полных секций возрастает с увеличением осадки. Оно минимально на уровне плоскости киля и максимально на уровне главной палубы. Схематическое распределение полных секций показано на рис. 6 в виде выделенной фоном зоны. При этом можно отметить, что цилиндрическая вставка корпуса судна формируется минимальным количеством

полных секций, которые имеются на уровне основной плоскости. На рис. 6 цилиндрическая вставка контейнеровоза формируется секциями 7–13 ( $S_1...S_{20}$ ).

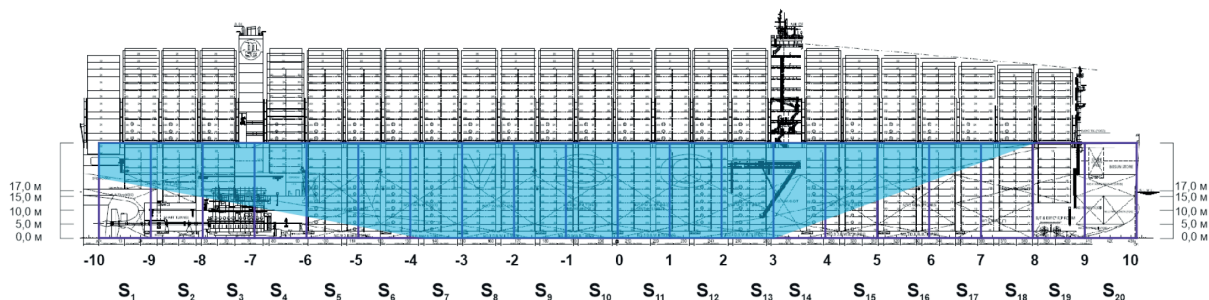


Рис. 6. Распределение полных секций по осадкам на примере контейнеровоза 24116

Для анализа особенностей конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровозов была выполнена серия масштабных измерений и расчетов.

### Результаты (Results)

В настоящей работе исследования проводились на примере среднетоннажных и крупнотоннажных контейнеровозов, включая ультрабольшие. Основные характеристики судов приведены в табл. 1. Каждый контейнеровоз идентифицирован по его контейнеровместимости. Например, контейнеровоз 8110 означает контейнеровоз с контейнеровместимостью 8110 ДФЭ.

Таблица 1

Основные характеристики модельных контейнеровозов

|                                             |        |        |        |         |         |         |         |
|---------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Судно (вместимость ДФЭ)                     | 3600   | 4200   | 4646   | 6724    | 8110    | 20170   | 24116   |
| Год постройки                               | 2013   | 2009   | 2003   | 2010    | 2008    | 2017    | 2023    |
| Валовая вместимость                         | 37 304 | 42 609 | 53 882 | 78 316  | 86 692  | 210 678 | 236 078 |
| Дедвейт, т                                  | 45 349 | 52 788 | 63 160 | 79 373  | 90 613  | 197 059 | 241 164 |
| Водоизмещение по летнюю марку, т            | 59 762 | 70 038 | 84 661 | 108 151 | 122 065 | 254 516 | 307 508 |
| Длина наибольшая, м                         | 221,16 | 268,80 | 294,09 | 302,00  | 316,00  | 399,86  | 399,99  |
| Длина между перпендикулярами, м             | 209,00 | 256,50 | 282,00 | 288,00  | 302,00  | 383,00  | 392,00  |
| Ширина, м                                   | 34,90  | 32,20  | 32,20  | 43,40   | 45,60   | 58,8    | 61,50   |
| Летняя осадка, м                            | 12,00  | 12,50  | 13,533 | 14,232  | 14,535  | 16,025  | 17,000  |
| Мощность главного двигателя, кВт            | 22890  | 54460  | 49410  | 57200   | 62920   | 59250   | 60400   |
| Удельная мощность главного двигателя, кВт/т | 0,50   | 1,03   | 0,78   | 0,72    | 0,69    | 0,30    | 0,25    |
| Эксплуатационная скорость, узлов            | 22,8   | 24,5   | 25,45  | 24,5    | 25,25   | 22,5    | 22,5    |

Одним из важнейших параметров, описывающих форму корпуса контейнеровоза, является соотношение его основных линейных характеристик:  $L/B$ ,  $B/d$  и  $L/d$ . Исследование этих параметров было выполнено в работе [13]. Для модельных контейнеровозов указанные соотношения приведены в табл. 2. Следует отметить, что контейнеровозы более ранней постройки имеют большую удельную мощность главного двигателя (в данном случае подразумевается отношение мощности главного двигателя в кВт к дедвейту в тоннах) и большую эксплуатационную скорость. Сочетание большой удельной мощности двигателя и большой скорости судна, как правило, сопровождается более острыми обводами корпуса судна и меньшими значениями коэффициентов полноты. Это объясняется тем, что в период 1990–2000-е гг. в приоритете были скорости доставки грузов при менее строгих экологических ограничениях.

Современные крупнотоннажные контейнеровозы имеют более полные обводы корпуса, меньшую удельную мощность главного двигателя и, соответственно, эксплуатационную скорость. Это объясняется тем, что в настоящее время приоритет отдается эффекту масштаба перевозок (медленнее, но больше) и охране окружающей среды, предполагающей снижение выхлопов в атмосферу вредных соединений от работы судовых двигателей.

Таблица 2

Соотношение основных линейных характеристик

| Контейнеровоз | $L/B$ | $B/d$ | $L/d$ |
|---------------|-------|-------|-------|
| 3600          | 5,99  | 2,91  | 17,42 |
| 4200          | 7,97  | 2,58  | 20,52 |
| 4646          | 8,76  | 2,38  | 20,84 |
| 6724          | 6,64  | 3,05  | 20,24 |
| 8110          | 6,62  | 3,14  | 20,78 |
| 20170         | 6,51  | 3,68  | 23,94 |
| 24116         | 6,37  | 3,62  | 23,06 |

Для каждого модельного контейнеровоза были построены графики зависимости площади ватерлинии от осадки (рис. 7).

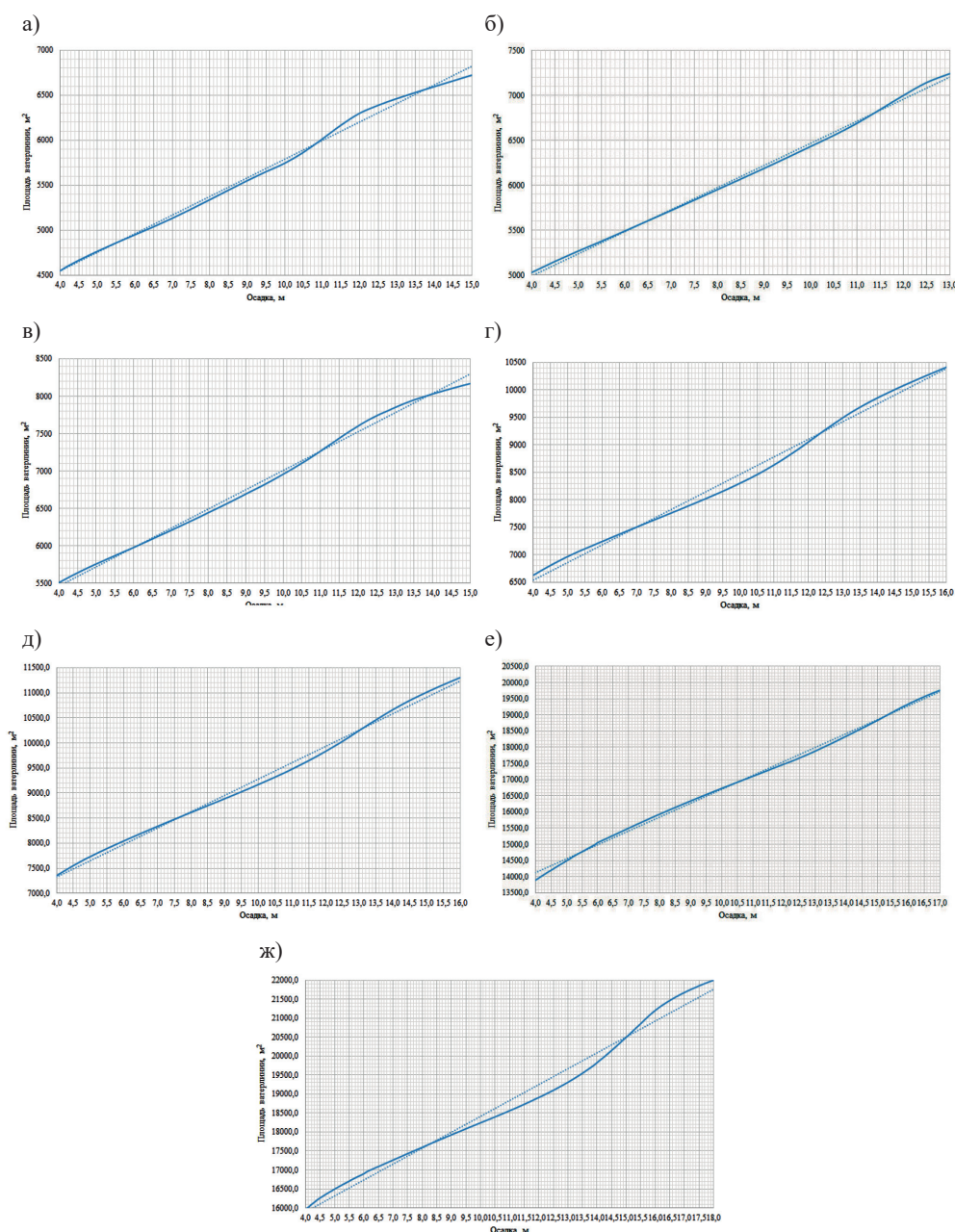


Рис. 7. Зависимость площади ватерлинии от осадки: а — контейнеровоз 3600 ДФЭ; б — контейнеровоз 4200 ДФЭ; в — контейнеровоз 4646 ДФЭ; г — контейнеровоз 6724 ДФЭ; д — контейнеровоз 8110 ДФЭ; е — контейнеровоз 20170 ДФЭ; ж — контейнеровоз 24116 ДФЭ



Графики были аппроксимированы линейной регрессией, которая была выбрана для упрощения оценки зависимости площади ватерлинии от осадки на практике. Уравнения аппроксимации и коэффициенты детерминации приведены в табл. 3. На каждом графике просматривается общая тенденция: один минимум и два максимума, в которых фактическое значение площади ватерлинии меньше и, соответственно, больше, чем аппроксимированное значение.

Абсолютная и относительная погрешности аппроксимации приведены в табл. 3. Как видно, линейная аппроксимация достаточно точно передает зависимость площади ватерлинии от осадки. Поэтому ее применение на практике обосновано.

Таблица 3

**Параметры зависимости площади ватерлинии от осадки**

| Контейнеровоз | Уравнение аппроксимации     | Коэффициент детерминации | Максимальная погрешность   |                  |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|
|               |                             |                          | Абсолютная, м <sup>2</sup> | Относительная, % |
| 3600          | $S_{WP} = 206,48d + 3721,7$ | 0,9967                   | +97                        | 1,6              |
| 4200          | $S_{WP} = 246,06d + 4007$   | 0,9977                   | +73                        | 1,0              |
| 4646          | $S_{WP} = 257,04d + 4436,8$ | 0,9961                   | +93                        | 1,2              |
| 6724          | $S_{WP} = 320,92d + 5255$   | 0,9925                   | –140                       | 1,7              |
| 8110          | $S_{WP} = 325,76d + 6020,8$ | 0,9952                   | –147                       | 1,6              |
| 20170         | $S_{WP} = 430,32d + 12392$  | 0,9976                   | –117                       | 0,7              |
| 24116         | $S_{WP} = 418,98d + 14220$  | 0,9828                   | –367                       | 1,9              |

Для каждого модельного контейнеровоза были выбраны значения коэффициентов  $C_b$  и  $C_w$  для заданного диапазона осадок, который примерно соответствует 60–100 % осадки по летнюю ватерлинию, как наиболее характерного с эксплуатационной точки зрения. Результаты представлены в табл. 4. Курсивом выделены значения  $C_b$  и  $C_w$  для осадок, превышающих осадку по летнюю ватерлинию, принятую как максимальную эксплуатационную.

Таблица 4

**Коэффициенты общей полноты и полноты площади ватерлинии модельных контейнеровозов**

| Контейнеровоз | Осадка, м  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | 7,0        | 8,0    | 9,0    | 10,0   | 11,0   | 12,0   | 13,0   | 14,0   | 15,0   | 16,0   | 17,0   |
|               | C <i>b</i> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 3600          | 0,5836     | 0,6002 | 0,6163 | 0,6320 | 0,6476 | 0,6640 | 0,6803 | 0,6956 | 0,7101 | –      | –      |
| 4200          | 0,5690     | 0,5870 | 0,6030 | 0,6190 | 0,6350 | 0,6510 | 0,6680 | –      | –      | –      | –      |
| 4646          | 0,5692     | 0,5852 | 0,6006 | 0,6157 | 0,6309 | 0,6467 | 0,6625 | 0,6777 | 0,6921 | –      | –      |
| 6724          | 0,4924     | 0,5073 | 0,5211 | 0,5344 | 0,5474 | 0,5608 | 0,5748 | 0,5892 | 0,6033 | 0,6170 | 0,6304 |
| 8110          | 0,4939     | 0,5090 | 0,5230 | 0,5362 | 0,5489 | 0,5615 | 0,5743 | 0,5875 | 0,6008 | 0,6139 | 0,6266 |
| 20170         | 0,5811     | 0,5964 | 0,6107 | 0,6241 | 0,6369 | 0,6492 | 0,6613 | 0,6731 | 0,6848 | 0,6962 | 0,7069 |
| 24116         | 0,6383     | 0,6490 | 0,6588 | 0,6680 | 0,6767 | 0,6851 | 0,6934 | 0,7018 | 0,7108 | 0,7205 | 0,7305 |
|               | C <i>w</i> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 3600          | 0,7023     | 0,7306 | 0,7595 | 0,7858 | 0,8225 | 0,8627 | 0,8853 | 0,9036 | 0,9209 | –      | –      |
| 4200          | 0,6920     | 0,7210 | 0,7490 | 0,7790 | 0,8100 | 0,8480 | 0,8770 | –      | –      | –      | –      |
| 4646          | 0,6834     | 0,7095 | 0,7369 | 0,7661 | 0,8002 | 0,8368 | 0,8644 | 0,8842 | 0,8994 | –      | –      |
| 6724          | 0,6007     | 0,6211 | 0,6419 | 0,6645 | 0,6914 | 0,7249 | 0,7601 | 0,7887 | 0,8120 | 0,8333 | 0,8541 |
| 8110          | 0,6042     | 0,6244 | 0,6443 | 0,6649 | 0,6872 | 0,7186 | 0,7431 | 0,7734 | 0,7987 | 0,8200 | 0,8399 |
| 20170         | 0,6920     | 0,7188 | 0,7420 | 0,7638 | 0,7863 | 0,8097 | 0,8337 | 0,8542 | 0,8681 | 0,8786 | 0,8870 |
| 24116         | 0,7164     | 0,7303 | 0,7440 | 0,7571 | 0,7704 | 0,7848 | 0,8015 | 0,8231 | 0,8508 | 0,8802 | 0,8996 |



Графически результаты табл. 4 представлены на рис. 8.

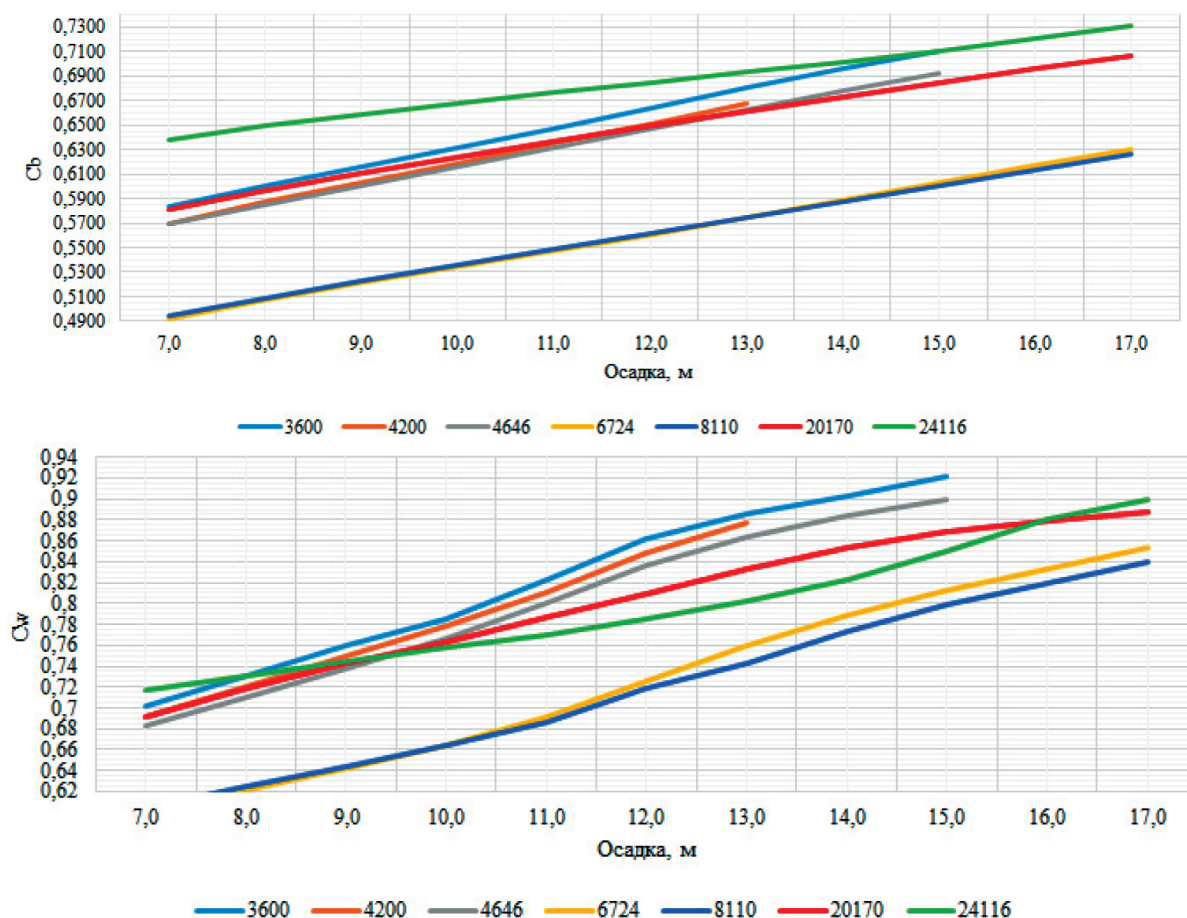


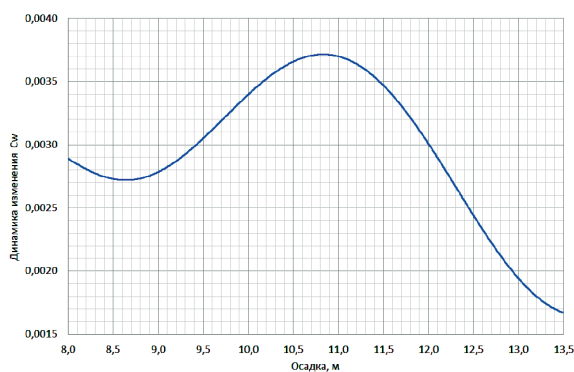
Рис. 8. Зависимость коэффициентов полноты от осадки

Из графиков на рис. 8 можно сделать следующие выводы:

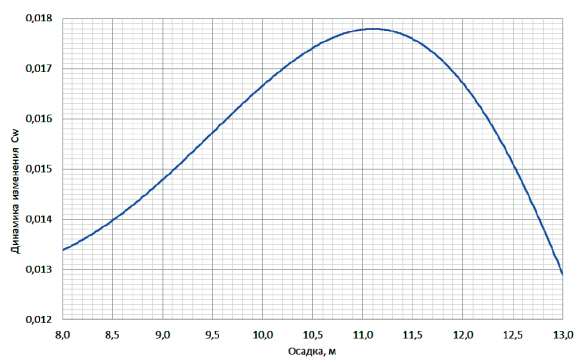
- значение  $C_b$  увеличивается практически линейно с увеличением осадки (коэффициент детерминации во всех случаях больше 0,997);
- увеличение значения  $C_w$  с увеличением осадки близко к линейному (коэффициент детерминации во всех случаях больше 0,975). Линии графика сопоставимы с линиями графиков соответствующих судов на рис. 7, поскольку площадь ватерлинии и коэффициент ее полноты взаимозависимы;
- увеличение тоннажа контейнеровозов не сопровождается однозначно увеличением значений  $C_b$  и  $C_w$ ;
- значения  $C_b$  и  $C_w$  не характеризуют тоннаж контейнеровоза. Средне- и крупнотоннажные контейнеровозы могут иметь близкие значения  $C_b$  и  $C_w$  (например, контейнеровозы 3600 и 20170);
- величины  $C_b$  и  $C_w$  контейнеровоза напрямую не зависят от соотношения его линейных характеристик (см. табл. 2);
- значения  $C_b$  и  $C_w$  могут мало различаться у контейнеровозов, близких по тоннажу, но имеющих разные линейные характеристики и построенных по схожему проекту, как, например, у контейнеровозов 6724 и 8110.

Значение коэффициента  $C_w$ , а соответственно, и площадь ватерлинии увеличиваются с увеличением осадки. Однако скорость увеличения  $C_w$  неравномерна, ее динамика для модельных контейнеровозов графически представлена на рис. 9. Данные на графиках были аппроксимированы с использованием полиномиальной линии тренда. Точность аппроксимации каждой линии тренда указана в подрисуточной подписи рис. 9.

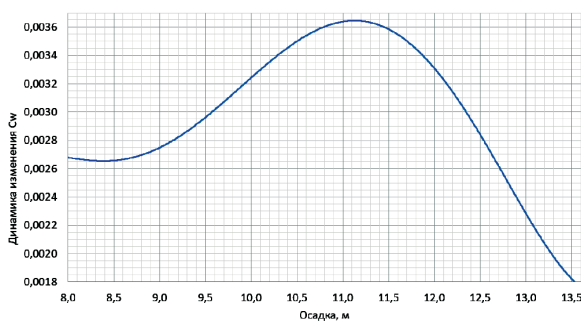
а)



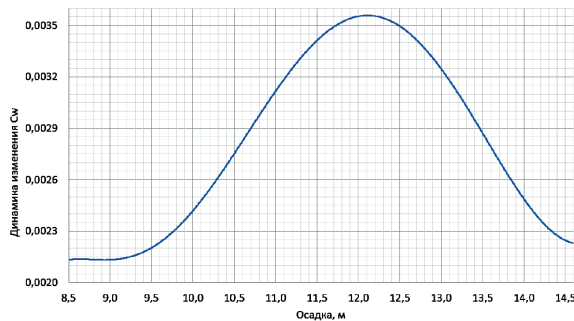
б)



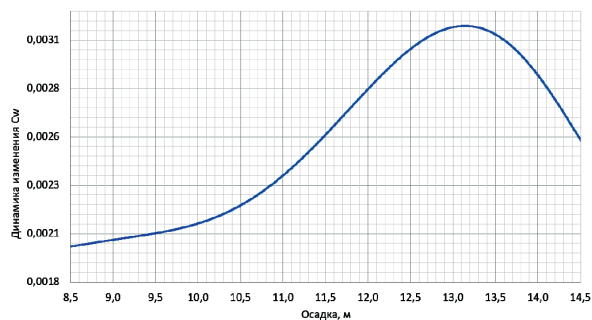
в)



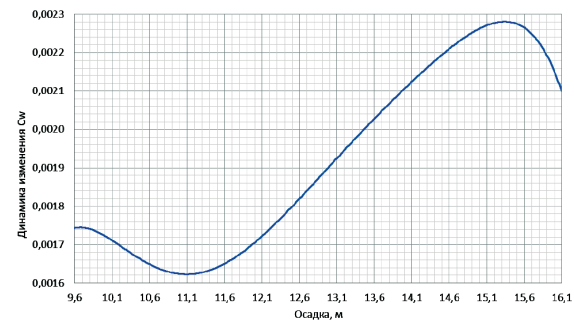
г)



д)



е)



ж)

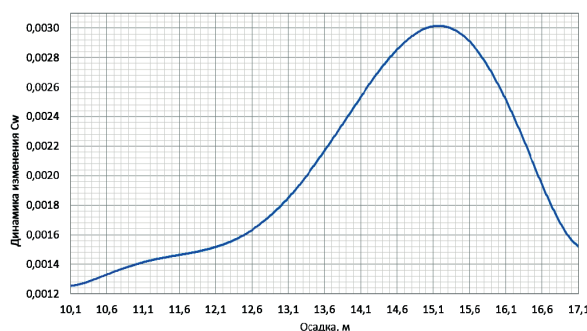


Рис. 9. Динамика изменения  $Sw$  от осадки:

а — контейнеровоз 3600 ДФЭ (0,9405); б — контейнеровоз 4200 ДФЭ (0,9306);  
в — контейнеровоз 4646 ДФЭ (0,9584); г — контейнеровоз 6724 ДФЭ (0,9841);  
д — контейнеровоз 8110 ДФЭ (0,9821); е — контейнеровоз 20170 ДФЭ (0,9448);  
ж — контейнеровоз 24116 ДФЭ (0,9796)

На каждом из графиков можно выделить участки с максимальным и минимальным изменением  $Sw$  в соответствующем диапазоне осадок (табл. 5). Если осадка судна находится в диа-

пазоне максимального изменения  $C_w$ , то следует ожидать, что ее изменение будет приводить к более значительному изменению площади ватерлинии и всех параметров, которые от нее зависят. И наоборот, в диапазоне осадок с минимальным изменением  $C_w$  изменение площади ватерлинии будет менее значительным.

Таблица 5

**Диапазоны осадок с максимальным и минимальным изменением  $C_w$**

| Контейнеровоз | Диапазон осадок, м           |                                  | Осадка по летнюю ватерлинию, м |
|---------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|               | Максимальное изменение $C_w$ | Минимальное изменение $C_w$      |                                |
| 3600          | 9,1–10,5; 11,1–13,5          | 8,2–9,1; 10,5–11,1               | 12,000                         |
| 4200          | 8,0–10,6; 11,6–13,0          | 10,6–11,6                        | 12,500                         |
| 4646          | 9,0–10,7; 11,6–13,5          | 8,0–9,0; 10,8–11,6               | 13,533                         |
| 6724          | 9,5–11,7; 12,5–14,4          | 8,5–9,5; 11,7–12,5;<br>14,4–14,5 | 14,232                         |
| 8110          | 10,5–12,7; 13,5–14,5         | 8,5–10,5; 12,7–13,5              | 14,535                         |
| 20170         | 11,6–15,0; 15,6–16,0         | 9,6–11,6; 15,0–15,6              | 16,025                         |
| 24116         | 12,7–14,8; 15,6–17,0         | 10,1–12,7; 14,8–15,6             | 17,000                         |

Следует отметить, что участки графиков на рис. 7, где они расходятся с аппроксимирующей линией, в общем совпадают с диапазонами осадок, на которых  $C_w$  имеет максимальное изменение (см. рис. 9 и табл. 5). Это можно объяснить тем, что в диапазонах осадок, где площадь ватерлинии изменяется более интенсивно, ее значение в большей мере отличается от соответствующего аппроксимированного значения. Также следует отметить, что для определенных значений осадок величина фактической и аппроксимированной площадей ватерлинии будут равны или очень близки. Эти значения осадок приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Совпадение и максимальное отличие фактических и аппроксимированных значений площади ватерлинии**

| Контейнеровоз | Осадка, м         |                      |
|---------------|-------------------|----------------------|
|               | Точное совпадение | Максимальное отличие |
| 3600          | 5,9; 10,8; 13,7   | 11,9                 |
| 4200          | 6,3; 11,3         | 12,5                 |
| 4646          | 6,0; 10,9         | 12,3                 |
| 6724          | 7,1; 12,3         | 10,4                 |
| 8110          | 7,7; 13,0         | 10,9                 |
| 20170         | 10,7; 15,1        | 12,9                 |
| 24116         | 8,5; 15,0         | 12,3                 |

Для определения доли площадей секций ватерлинии от ее общей площади были выбраны контейнеровозы двух архитектурных типов, имеющих свои особенности строения корпуса. Контейнеровоз вместимостью 8110 ДФЭ представляет собой крупнотоннажный контейнеровоз классической конструкции со смещенной в корму надстройкой и более острыми носовыми обводами. Контейнеровоз вместимостью 24116 ДФЭ представляет собой современный архитектурный тип для ультрабольших контейнеровозов со смещенной в нос жилой надстройкой и смещенной в корму машинной надстройкой (по классификации автора — «двухнадстроечник») и более полными носовыми обводами (рис. 10).

Для каждого судна были выбраны по две осадки: минимальная ( $d_{\min}$ ) и максимальная ( $d_{\max}$ ), соответствующая осадке по летнюю ватерлинию. Для контейнеровоза 8110 —  $d_{\min} = 10,00$  м,  $d_{\max} = 14,53$  м; для контейнеровоза 24116 —  $d_{\min} = 11,00$  м,  $d_{\max} = 17,00$  м. Для каждой осадки с использованием построочных чертежей был сформирован профиль ватерлинии и рассчитана площадь каждой секции с использованием масштабной сетки. Доля каждой секции определялась

отношением ее площади к общей площади ватерлинии, в процентах. Из двух значений для  $d_{\min}$  и для  $d_{\max}$  определялось среднее значение для каждого судна, и затем общее среднее значение. Очевидно, что рассчитываемые величины для промежуточных осадок будут находиться в диапазоне между полученными минимальными и максимальными значениями, приведенными в табл. 7.

а)

б)



Рис. 10. Архитектурные типы современных крупнотоннажных контейнеровозов:  
а — классический (контейнеровоз 8110); б — «двухнастроечник» (контейнеровоз 24116)  
Источники заимствования: [www.ship-photo-roster.com](http://www.ship-photo-roster.com); [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)

Таблица 7

Доля площадей секций ватерлинии от общей площади ватерлинии

| Номер секции | Доля, %            |                |         |                     |                |         | Общая средняя |
|--------------|--------------------|----------------|---------|---------------------|----------------|---------|---------------|
|              | Контейнеровоз 8110 |                |         | Контейнеровоз 24116 |                |         |               |
|              | Для $d_{\min}$     | Для $d_{\max}$ | Средняя | Для $d_{\min}$      | Для $d_{\max}$ | Средняя |               |
| 1            | 0,0                | 3,2            | 1,6     | 0,0                 | 3,2            | 1,6     | 1,6           |
| 2            | 1,0                | 5,3            | 3,2     | 1,6                 | 5,3            | 3,4     | 3,3           |
| 3            | 3,6                | 6,3            | 4,9     | 4,7                 | 5,5            | 5,1     | 5,0           |
| 4            | 6,0                | 6,3            | 6,2     | 6,0                 | 5,6            | 5,8     | 6,0           |
| 5            | 7,0                | 6,3            | 6,7     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,4           |
| 6            | 7,5                | 6,3            | 6,9     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,5           |
| 7            | 7,5                | 6,3            | 6,9     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,5           |
| 8            | 7,5                | 6,3            | 6,9     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,5           |
| 9            | 7,5                | 6,3            | 6,9     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,5           |
| 10           | 7,5                | 6,3            | 6,9     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,5           |
| 11           | 7,5                | 6,3            | 6,9     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,5           |
| 12           | 7,3                | 6,3            | 6,8     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,4           |
| 13           | 7,0                | 6,2            | 6,6     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,3           |
| 14           | 6,4                | 5,9            | 6,1     | 6,5                 | 5,6            | 6,0     | 6,1           |
| 15           | 5,5                | 5,4            | 5,4     | 6,4                 | 5,6            | 6,0     | 5,7           |
| 16           | 4,4                | 4,2            | 4,3     | 5,9                 | 5,5            | 5,7     | 5,0           |
| 17           | 3,1                | 3,0            | 3,0     | 4,9                 | 5,3            | 5,1     | 4,1           |
| 18           | 1,9                | 1,9            | 1,9     | 3,5                 | 4,6            | 4,1     | 3,0           |
| 19           | 1,1                | 1,0            | 1,1     | 1,8                 | 3,0            | 2,4     | 1,8           |
| 20           | 0,5                | 0,4            | 0,4     | 0,2                 | 0,9            | 0,6     | 0,5           |

Из табл. 7 видно, что доля площади ватерлинии каждой полной секции составляет в среднем 6,5 % от общей площади ватерлинии. Доли кормовой и носовой секций в среднем составляют 1,6 % и 0,5 %, соответственно. Для трех диапазонов осадок выбранных для исследования контейнеровозов с шагом осадки в 0,5 м было определено среднее значение  $C_{w_i}$ . Результаты сведены в табл. 8.

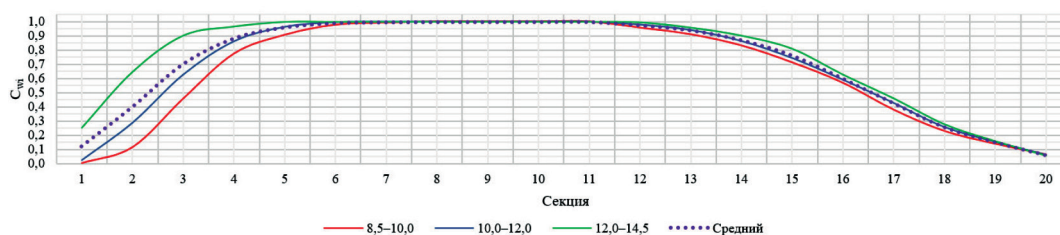
Таблица 8

Коэффициенты полноты площади секций ватерлинии  $C_{w_i}$

| Номер<br>секции | Коэффициент полноты $C_{w_i}$ |           |           |         |                     |           |           |         |                  |
|-----------------|-------------------------------|-----------|-----------|---------|---------------------|-----------|-----------|---------|------------------|
|                 | Контейнеровоз 8110            |           |           |         | Контейнеровоз 24116 |           |           |         |                  |
|                 | Диапазоны осадок, м           |           |           |         |                     |           |           |         |                  |
|                 | 8,5–10,0                      | 10,0–12,0 | 12,0–14,5 | Средний | 11,0–13,0           | 13,0–15,0 | 15,0–17,0 | Средний | Общий<br>средний |
| 1               | 0,0022                        | 0,0241    | 0,2525    | 0,0930  | 0,0015              | 0,0925    | 0,3736    | 0,1558  | 0,1244           |
| 2               | 0,1151                        | 0,2881    | 0,6475    | 0,3502  | 0,2919              | 0,5457    | 0,8594    | 0,5657  | 0,4580           |
| 3               | 0,4577                        | 0,6276    | 0,9035    | 0,6629  | 0,7890              | 0,8988    | 0,9751    | 0,8876  | 0,7753           |
| 4               | 0,7746                        | 0,8619    | 0,9671    | 0,8679  | 0,9438              | 0,9784    | 0,9984    | 0,9735  | 0,9207           |
| 5               | 0,9064                        | 0,9637    | 0,9997    | 0,9566  | 0,9994              | 1,0000    | 1,0000    | 0,9998  | 0,9782           |
| 6               | 0,9775                        | 0,9965    | 0,9998    | 0,9913  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 0,9957           |
| 7               | 0,9923                        | 1,0000    | 1,0000    | 0,9974  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 0,9987           |
| 8               | 1,0000                        | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000           |
| 9               | 1,0000                        | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000           |
| 10              | 1,0000                        | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000           |
| 11              | 1,0000                        | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 1,0000           |
| 12              | 0,9460                        | 0,9796    | 0,9964    | 0,9776  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 0,9888           |
| 13              | 0,9133                        | 0,9411    | 0,9594    | 0,9367  | 1,0000              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 0,9684           |
| 14              | 0,8308                        | 0,8633    | 0,9024    | 0,8655  | 0,9999              | 1,0000    | 1,0000    | 1,0000  | 0,9328           |
| 15              | 0,7114                        | 0,7433    | 0,8098    | 0,7548  | 0,9902              | 0,9974    | 0,9994    | 0,9957  | 0,8753           |
| 16              | 0,5674                        | 0,5905    | 0,6273    | 0,5951  | 0,9416              | 0,9651    | 0,9822    | 0,9630  | 0,7791           |
| 17              | 0,3781                        | 0,4264    | 0,4594    | 0,4213  | 0,7981              | 0,8665    | 0,9304    | 0,8650  | 0,6432           |
| 18              | 0,2284                        | 0,2568    | 0,2769    | 0,2540  | 0,6025              | 0,7123    | 0,7948    | 0,7032  | 0,4786           |
| 19              | 0,1384                        | 0,1531    | 0,1579    | 0,1498  | 0,3114              | 0,3954    | 0,4953    | 0,4007  | 0,2753           |
| 20              | 0,0631                        | 0,0618    | 0,0561    | 0,0603  | 0,0386              | 0,0547    | 0,1217    | 0,0717  | 0,0660           |

Графически результаты, представленные в табл. 8, показаны на рис. 11. Зависимость коэффициента  $C_{w_i}$  от номера секции ватерлинии формирует кривую, контур которой достаточно точно повторяет полушироты судна по аналогии с представленными на рис. 2, что в целом подтверждает корректность выполненных расчетов.

а)



б)

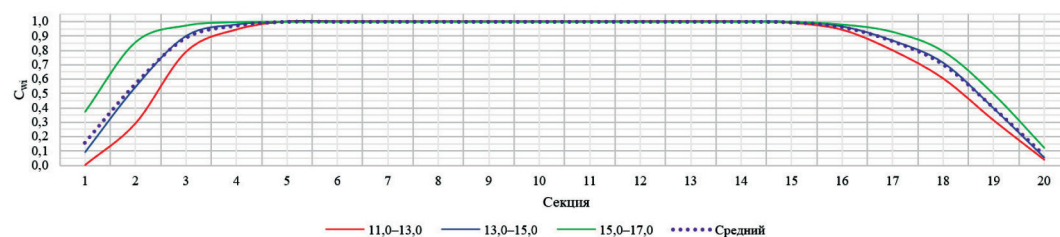


Рис. 11.  $C_{w_i}$  по секциям площади ватерлинии:  
а — контейнеровоз 8110; б — контейнеровоз 24116



Таблица 9

## Количество полных секций ватерлинии в зависимости от осадки

| Контейнеровоз 8110 |                          | Контейнеровоз 24116 |                          |
|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Осадка, м          | Количество полных секций | Осадка, м           | Количество полных секций |
| 8,50               | 4                        | 11,00               | 8                        |
| 9,00               | 4                        | 11,50               | 8                        |
| 9,50               | 4                        | 12,00               | 8                        |
| 10,00              | 5                        | 12,50               | 8                        |
| 10,50              | 5                        | 13,00               | 10                       |
| 11,00              | 5                        | 13,50               | 10                       |
| 11,50              | 5                        | 14,00               | 10                       |
| 12,00              | 5                        | 14,50               | 10                       |
| 12,50              | 7                        | 15,00               | 10                       |
| 13,00              | 7                        | 15,50               | 10                       |
| 13,50              | 7                        | 16,00               | 10                       |
| 14,00              | 7                        | 16,50               | 10                       |
| 14,50              | 7                        | 17,00               | 12                       |

Количество полных секций однозначно не зависит от архитектурного типа контейнеровоза. Поскольку как традиционные контейнеровозы, так и контейнеровозы-двухнадстроечники со схожими линейными характеристиками будут иметь примерно одинаковое количество полных секций. Вместе с тем очевидно, что контейнеровозы с большей длиной имеют большее количество полных секций, поскольку именно средняя часть корпуса судна (цилиндрическая вставка) и обеспечивает большую контейнеровместимость.

С целью проверки возможности использования полученных средних значений  $C_{w_i}$  (см. табл. 8) для контейнеровозов любого тоннажа был выполнен анализ точности применительно к модельным контейнеровозам, используемым в настоящем исследовании. Для проверки использовались средние значения по каждому из двух модельных контейнеровозов и их общие средние значения  $C_{w_i}$ . Результаты приведены в табл. 10 и 11.

Таблица 10

Анализ точности средних значений  $C_{w_i}$  по типам контейнеровозов

| Контейнеровоз | Диапазон осадок с погрешностью $C_{w_i}$ , м |             | Максимальная погрешность для рабочего диапазона осадок, % |                |
|---------------|----------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------|----------------|
|               | $\leq 5\%$                                   | $\leq 1\%$  | Осадки, м                                                 | Погрешность, % |
| 8110          | 9,90–12,70                                   | 11,10–11,60 | 9,00–14,50                                                | +11,6          |
| 24116         | 12,30–15,70                                  | 13,90–14,50 | 10,50–17,00                                               | –8,6           |

В табл. 10 приведены результаты проверки точности применения средних значений  $C_{w_i}$  для контейнеровозов 8110 и 24116, полученные следующим образом. На основе средних значений  $C_{w_i}$  рассчитывается площадь ватерлинии данного судна. Полученное расчетное значение сравнивается с истинным значением площади ватерлинии *каждого из двух судов отдельно*, т. е. расчетные значения для судна 8110 сравниваются с истинными значениями для этого же судна.

В табл. 11 приведены результаты проверки точности применения общих средних значений, полученных для контейнеровозов 8110 и 24116 применительно ко всем модельным контейнеровозам.

Таблица 11

**Анализ точности общих средних значений  $C_{w_i}$**

| Контейнеровоз | Диапазон осадок с погрешностью<br>$C_{w_i}$ , м |             | Максимальная погрешность для рабочего<br>диапазона осадок, % |                |
|---------------|-------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------|----------------|
|               | $\leq 5\%$                                      | $\leq 1\%$  | Осадки, м                                                    | Погрешность, % |
| 3600          | 8,50–11,10                                      | 9,20–9,80   | 7,00–12,00                                                   | –9,4           |
| 4200          | 9,05–11,55                                      | 9,60–10,10  | 7,50–12,50                                                   | –9,4           |
| 4646          | 9,60–12,00                                      | 10,00–10,50 | 8,00–13,50                                                   | –11,8          |
| 6724          | 10,80–12,90                                     | 13,10–13,60 | 9,00–14,50                                                   | –12,0          |
| 8110          | 10,50–13,20                                     | 13,70–14,30 | 9,00–14,50                                                   | –10,2          |
| 20170         | 11,00–15,10                                     | 11,40–12,40 | 10,00–16,00                                                  | –7,3           |
| 24116         | 12,00–15,60                                     | 10,70–11,80 | 10,50–17,00                                                  | +8,3           |

Как видно из табл. 10 и 11, результаты применения средних значений  $C_{w_i}$  показывают неудовлетворительную точность. Относительная погрешность достигает 10 % и более. Даже применение средних значений  $C_{w_i}$  конкретного контейнеровоза к этому контейнеровозу (см. табл. 10) не дает достаточной точности, и, в общем, сопоставимо с применением общего среднего значения (см. табл. 11). При этом можно отметить, что погрешность до 5 % достигается при вполне значительном диапазоне осадок, а погрешность до 1 % — в очень ограниченном диапазоне осадок. Это подтверждает тот факт, что значение  $C_{w_i}$  в значительной степени зависит от осадки судна и применение средних значений, полученных для всего диапазона эксплуатационных осадок, не даст удовлетворительного значения для конкретной осадки. Получение удовлетворительной точности, когда погрешность  $\leq 1\%$ , возможно только в узком диапазоне осадок, порядка 0,5 м.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что найти универсальное значение  $C_{w_i}$ , которое бы с достаточной точностью удовлетворяло контейнеровозам разного тоннажа с разными линейными характеристиками и для любой осадки не представляется возможным без дополнительных более тщательных исследований этого вопроса.

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для определения гидростатических характеристик контейнеровоза на волнении целесообразно разбивать корпус судна на секции и определять соответствующие расчетные параметры сначала для каждой секции с учетом ее осадки, а затем — для всего корпуса.
2. Понимание зависимости конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровоза позволяет осуществлять как приближенные расчеты с применением средних значений исходных параметров, так и достаточно точные для практического применения расчеты с использованием фактических параметров конкретного судна.
3. Однозначных зависимостей между конструктивными и гидростатическими характеристиками контейнеровозов разного тоннажа в рамках данного исследования выявлено не было. В одном случае это может означать, что таких зависимостей нет, в другом — что требуются дальнейшие исследования этого вопроса.
4. Введение такого параметра, как коэффициент полноты площади секции ватерлинии  $C_{w_i}$ , позволяет упростить расчеты гидростатических параметров судна на волнении.
5. Применение средних значений  $C_{w_i}$  показало в целом неудовлетворительную точность и, вероятно, требует дальнейших исследований.

### Заключение (Conclusion)

Конструктивные и гидростатические характеристики контейнеровоза обуславливают его поведение на волнении, влияют на остойчивость и параметры качки. Понимание особенностей этих характеристик судна позволяет оценивать вероятность наступления потенциально опасных ситуаций, которые могут возникать на волнении, включая резонансную качку.

Результаты, полученные по итогам проведенного в рамках настоящей работы исследования, демонстрируют обоснованность утверждений о необходимости учета конструктивных и гидростатических характеристик судов-контейнеровозов для оценки судоводителями их поведения на волнении. Эти результаты планируется использовать в дальнейших исследованиях, направленных на разработку упрощенных практико-ориентированных методик расчета и контроля параметров судна и его остойчивости на волнении, включая более подробное изучение параметров ватерлинии и их изменения на волнении, выявление возможных зависимостей конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровозов разного тоннажа, определение опасной длины волны по отношению к длине контейнеровоза и оценку вероятности попадания судна в условиях опасной резонансной качки с учетом параметров остойчивости и волнения.

Использование судоводителями результатов исследований, проведенных в данной работе, в реальных условиях эксплуатации судна будет в значительной мере способствовать повышению безопасности эксплуатации контейнеровозов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаева З. М. Влияние ветро-волновых возмущений на гидродинамические характеристики корпуса судна / З. М. Абдуллаева // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. — 2023. — Т. 1. — С. 184–188. — EDN UBJSY.
2. Сичкарев В. И. Идентификация волновых условий по спектру качки судна / В. И. Сичкарев, В. П. Умрихин, М. Д. Тарасенко // Транспортное дело России. — 2024. — № 7. — С. 156–161. — EDN LXHNHW.
3. Хвостов Р. С. Методика численного интегрирования уравнений, описывающих поверхность погруженной в воду части корпуса судна / Р. С. Хвостов // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 3(91). — С. 51–54. — EDN JHCVVW.
4. Хвостов Р. С. Математическое описание поверхности погруженной в воду части корпуса судна / Р. С. Хвостов, В. И. Тихонов, А. Н. Клементьев // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 3(91). — С. 48–51. — EDN TGSZDX.
5. Хвостов Р. С. Обоснование способа определения геометрических характеристик погруженной в воду части корпуса судна для адекватного моделирования действующих на него усилий / Р. С. Хвостов, М. В. Осокин // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 4(92). — С. 56–58. — EDN FOGNKO.
6. Kim B-S. Study on Hull Optimization Process Considering Operational Efficiency in Waves / B-S. Kim, M-J. Oh, J-H. Lee, Y-H. Kim, M-I. Roh // Processes. — 2021. — Vol. 9. — Is. 5. DOI: 10.3390/pr9050898.
7. Matsui S. A new mathematical hull-form with 10-shape parameters for evaluation of ship response in waves / S. Matsui // Journal of Marine Science and Technology. — 2011. — Vol. 3. — 14 с. — DOI: 10.1007/s00773-021-00849-3.
8. Uzunoglu C. E. Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves Thesis for obtaining the degree of Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering / C. E. Uzunoglu — 2011. — 115 с.
9. Осокин М. В. Способ определения момента инерции ватерлинии для оценки остойчивости судна на волнении / М. В. Осокин, Р. С. Хвостов // Речной транспорт (XXI век). — 2020. — № 3(95). — С. 40–43. — EDN FWXKPC.
10. Осокин М. В. Проблемы практического применения второго поколения критериев остойчивости судна в неповреждённом состоянии / М. В. Осокин, М. В. Жуков // Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород–Новосибирск–Владивосток–Самара, 23–26 апреля 2024 года. — Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. — С. 7. — EDN SUTNHY.
11. Zinchenko S. Analytical Model of a Ship's Stability on a Regular Wave / S. Zinchenko, O. Tovstokoryi, K. Kyrychenko, P. Nosov, I. Popovych // Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1 — Springer Nature Switzerland, 2024. — С. 51–68.
12. Осокин М. В. Оценка риска потери остойчивости и возникновения параметрического резонанса качки на примере контейнеровоза-фидера / М. В. Осокин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 59. — С. 168–176. — EDN AEFKOP.

13. Якута И. В. Исследование влияния изменения отношений главных размерений на мореходные качества контейнеровозов / И. В. Якута // Известия КГТУ. — 2023. — № 68. — С. 110–124. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124. — EDN QHACIU.

## REFERENCES

1. Abdullaeva, Z. M. “Influence of wind-wave disturbances on the hydrodynamic characteristics of the vessel hull.” *International Conference On Control In Technical Systems 1* (2023): 184–188.
2. Sichkarev, V. I., V. P. Umrikhin and M. D. Tarasenko. “Identification of wave conditions based on the ship’s pitching spectrum.” *Transport Business Of Russia* 7 (2024): 156–161.
3. Khvostov, R. S. “The method of numerical integration of equations which describe surface of ship’s hull part immersed in water.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 3(91) (2019): 51–54.
4. Khvostov, R. S., V. I. Tikhonov and A. N. Klement’ev. “Mathematical description of surface of ship’s hull part immersed in water.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 3(91) (2019): 48–51.
5. Khvostov, R. S. and M. V. Osokin. “The substantiation of definition method for geometric parameters of submerged in water part of ship’s hull for adequate modelling forces which influence on it.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 4(92) (2019): 56–58.
6. Kim, B-S., M-I. Roh, et al. “Study on Hull Optimization Process Considering Operational Efficiency in Waves.” *Processes* 9.5 (2021). DOI: 10.3390/pr9050898.
7. Matsui, S. “A new mathematical hull-form with 10-shape parameters for evaluation of ship response in waves.” *Journal of Marine Science and Technology* 3 (2011): 508–521. DOI: 10.1007/s00773-021-00849-3.
8. Uzunoglu, C. E. *Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves*. Thesis for obtaining the degree of Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering, 2011: 115 с.
9. Osokin, M. V. and R. S. Khvostov. “The principle of definition of inertia moment of waterline to estimation ship’s stability on waving.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 3(95) (2020): 40–43.
10. Osokin, M. V. and M. V. Zhukov. “Problems of practical application of the second generation criteria for intact stability of a vessel.” *Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 4-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhniy Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok-Samara, 23–26 aprelya 2024 goda*. Nizhniy Novgorod: Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta, 2024: 7.
11. Zinchenko, S., O. Tovstokoryi, K. Kyrychenko, P. Nosov and I. Popovych “Analytical Model of a Ship’s Stability on a Regular Wave.” *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1* Springer Nature Switzerland, 2024: 51–68.
12. Osokin, M. V. “Risk assessment of loss of stability and parametric rolling on example of feeder container ship.” *Bulletin Of The Volga State Academy Of Water Transport* 59 (2019): 168–176.
13. Yakuta, I. V. “Study of the effect of changing the ratio of main dimensions on the seaworthiness of container ships.” *Kstu News* 68 (2023): 110–124. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Царик Руслан Станиславович** — капитан, кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»  
690003, Российская Федерация, Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, д. 50а  
e-mail: tsarik@msun.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Tsarik, Ruslan Stanislavovich** — Master mariner, PhD  
Maritime State University named  
after admiral G. I. Nevelskoi  
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,  
Russian Federation  
e-mail: tsarik@msun.ru

Статья поступила в редакцию 13 мая 2025 г.  
Received: May 13, 2025.

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-584-591

EDN SZETGC

## TO THE PROBLEM OF REDUCING THE AMOUNT OF EXCHANGE ELECTRIC POWER FLOWS BETWEEN PARALLEL-OPERATING DIESEL GENERATORS OF ALTERNATING CURRENT

**A. N. Sobolenko<sup>1</sup>, G. B. Gorelik<sup>1</sup>, A. Yu. Chistyakov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok Russian Federation,

<sup>2</sup> State Marine Technical University,  
Saint-Petersburg, Russian Federation

*The problems associated with mutual flows of electric energy between several alternating current diesel generators during their parallel operation are considered. It is noted that of electrical energy in some cases leads to emergency situations, reduces the efficiency of operation of units and their reliability. Fluctuations in operating parameters cause voltage pulsations, reduce unit efficiency, limit the use of full power, have a negative psychophysiological effect on personnel, and lead to increased wear of rotation speed controllers units. At the same time, if we present the phenomena occurring in the system of parallel diesel generators in a simplified manner, we can provide a scientific understanding of the essence of the processes and develop practical recommendations for ensuring the quality of the energy generated. A mathematical model of two parallel diesel generators is presented, from which it follows that the exchange oscillations are of a single-node form, the node of which is located in the middle of a conditional flexible shaft in the form of an electrical connection connecting the diesel generators. With a significant swing in the amplitude of oscillations, their frequency in various load modes is 2 to 5 Hz. It is close to the frequency of the disturbing forces caused by the working processes in the diesel engine. In a simplified torsion system for parallel operation of a group of diesel generators on a powerful electric network, each unit should be considered as a single-mass torsion system. The natural frequency of a single-node oscillation form has one node in the zone of conditional electrical connection between generators. Resonance oscillations in the system arise due to an unstable working process as a result of unstable operation of the fuel equipment from cycle to cycle. This leads to an increased flow of electrical energy between parallel diesel generators. This phenomenon is usually accompanied by a decrease in the efficiency of the installation as a whole.*

*Keywords: electrical power flows, exchange oscillations, oscillation amplitude, torsion circuit, resonant oscillations, alternative current, voltage pulsations, operation safety.*

### For citation:

Sobolenko, A. N., G. B. Gorelik and A. Yu. Chistyakov "To the problem of reducing the amount of exchange electric power flows between parallel-operating diesel generators of alternating current." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 584–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-584-591.

**УДК 621.436.03 (031)**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОБМЕННЫХ ПЕРЕТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**А. Н. Соболенко<sup>1</sup>, Г. Б. Горелик<sup>1</sup>, А. Ю. Чистяков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Россия,

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Морской технический университет  
Санкт-Петербург, Россия



*Рассмотрены проблемы, связанные с взаимными перетеканиями электрической энергии между несколькими дизель-генераторов переменного тока при их параллельной работе. Отмечается, что амплитуда электроэнергии в ряде случаев приводит к аварийным ситуациям, снижает эффективность эксплуатации агрегатов и их надежность. Колебания режимных параметров вызывают пульсацию напряжения, снижают коэффициент полезного действия агрегатов, ограничивают использование полной мощности, оказывают отрицательное психофизиологическое воздействие на персонал, приводят к повышенному износу агрегатов. Понимание сути происходящих процессов и физической природы обменных колебаний позволяют принимать соответствующие технические решения, выполнять опытно-конструкторские разработки и обеспечивать безопасность эксплуатации дизель-электрических агрегатов при их параллельной работе. Из представленной математической модели двух параллельно работающих дизель-генераторов следует, что обменные колебания, узел которых находится посередине условного податливого вала в виде электрической связи, соединяющей ДГ, имеют одноузловую форму. Обращается внимание на то, что при значительном размахе амплитуды колебаний их частота на различных режимах нагрузки близка к частоте возмущающих сил, вызванных рабочими процессами в дизеле. Отмечается, что в упрощенной крутильной системе для параллельной работы группы ДГ на мощную электрическую сеть следует рассматривать каждый агрегат в качестве одномассовой крутильной системы. Сделан вывод о том, что собственная частота одноузловой формы колебаний имеет один узел в зоне условной электрической связи между генераторами. Рассмотрены резонансные колебания в системе, возникающие из-за неустойчивости рабочего процесса вследствие нестабильной работы топливной аппаратуры от цикла к циклу, которые приводят к повышенному перетеканию электрической энергии между параллельно работающими дизель-генераторами. Это явление сопровождается, как правило, снижением эффективности установки в целом.*

*Ключевые слова:* перетоки электрической энергии, обменные колебания, крутильная схема, резонансные колебания, переменный ток, пульсации напряжения, безопасность эксплуатации.

**Для цитирования:**

Соболенко А. Н. Исследование проблемы снижения величины обменных перетоков электрической мощности между параллельно работающими дизель-генераторами переменного тока / А. Н. Соболенко, Г. Б. Горелик, А. Ю. Чистяков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 584–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-584-591. — EDN SZETGC.

## **Введение (Introduction)**

Проблеме статической устойчивости второго рода в энергетике посвящено много исследований в первую очередь в отечественной литературе. Были предложены различные пути ее решения [1–4]. В соответствии с терминологией международной организации энергетиков (СИГРЭ) проблема получила наименование «колебания». При этом понимают способность дизель-генераторов (ДГ), включенных параллельно, работать без самораскачивания после малого возмущения, т. е. *устойчивость системы в малом*. Колебания в системе, обуславливаемые неустойчивостью 2-го рода, из-за наличия нелинейности, имеют конечную амплитуду и, как правило, не приводят к выпадению дизель-генератора из синхронизма, что схоже с колебаниями от действия вынуждающих сил. В результате имеет место неустойчивая работа, при которой электрические и механические величины самопроизвольно колеблются около положения равновесия. Колебания режимных параметров приводят к ряду отрицательных последствий. В частности, обменные колебания мощности между параллельно работающими агрегатами приводят к повышенному износу регуляторов частоты вращения. Вызывая пульсацию напряжения, они затрудняют работу систем автоматизации, снижают КПД агрегатов, оказывают отрицательное психофизиологическое воздействие на обслуживающий персонал, а иногда даже исключают возможность параллельной работы.

В настоящее время отмечается существенное сокращение количества исследований по данной проблеме, но сам вопрос по-прежнему остается нерешенным, поскольку практика эксплуатации связана с вопросами обеспечения качества работы параллельной работы ДГ переменного тока<sup>1</sup>. Следует также отметить, что при этом большая часть дизель-генераторов по-прежнему остается иностранного производства.

<sup>1</sup> ISO 8528–1:2005 «Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets. Part 1: Application, ratings and performance»).

Цель работы — представить аспекты параллельной работы дизель-генераторов и определить возможные крутильные схемы для различных случаев, показать подходы к определению параметров крутильной системы на основе экспериментального исследования, сформировать математическую модель для характерного случая эксплуатации и представить решение.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Физическая природа обменных колебаний при параллельной работе.* Вполне очевидна зависимость величины обменных колебаний электрической мощности от моментов инерции вращающихся масс и частоты вращения, т. е. от условий, связанных с достижением резонанса между собственными колебаниями системы работающих параллельно агрегатов и источником возмущающих сил. Как следует из работ автора [5, 6], для двух параллельно работающих дизель-генераторов крутильную схему системы можно представить в виде *многомассовой крутильной системы* (рис. 1).

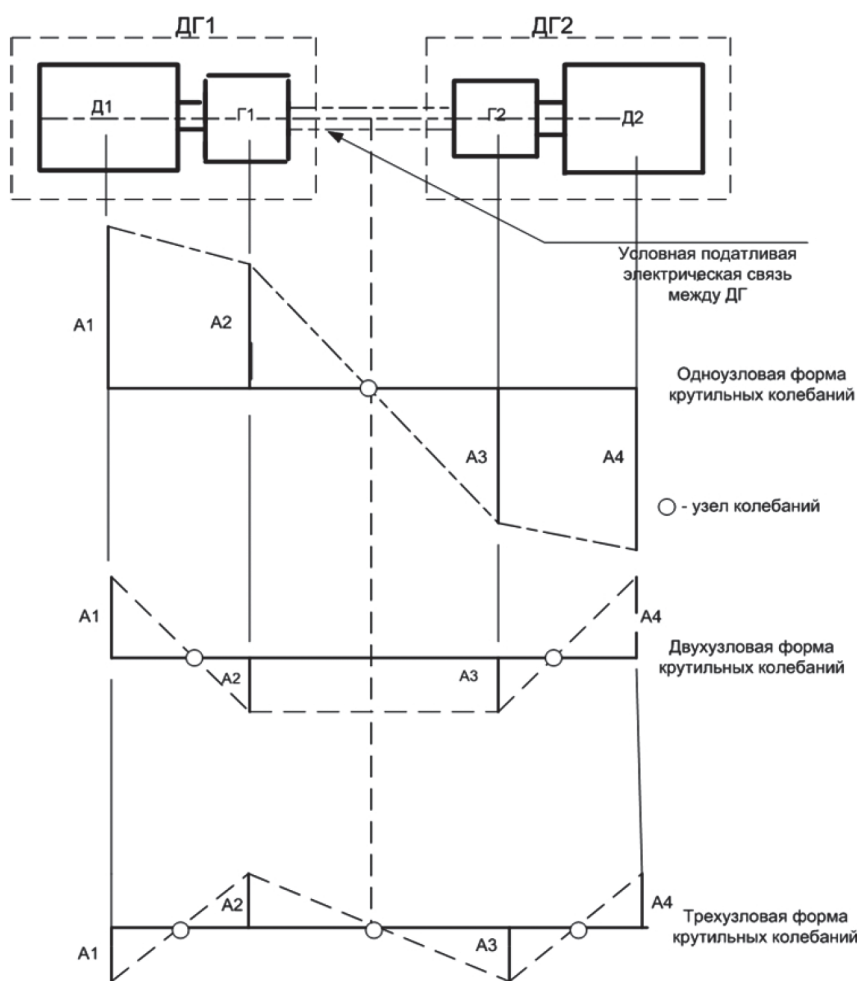


Рис. 1. Схема четырехмассовой крутильной системы из двух параллельно работающих дизель-генераторов  
Условные обозначения:

A1–A4 — условные амплитуды крутильных колебаний различных форм;  
кружками показаны узлы крутильных колебаний различных форм

Наибольший интерес представляют обменные колебания одноузловой формы, узел которых находится посередине условного податливого вала в виде электрической связи, соединяющей ДГ. При значительном размахе амплитуды колебаний их частота на различных режимах нагрузки, которая составляет 2–5 Гц, близка к частоте возмущающих сил, вызванных рабочими процессами в дизеле.

Упрощенная крутильная система приведена на рис. 2. Для параллельной работы группы дизель-генераторов с мощной электрической сетью следует рассматривать каждый агрегат в качестве одномассовой крутильной системы (рис. 3). Собственная частота одноузловой формы колебаний имеет один узел в зоне условной электрической связи между генераторами, а наибольшие амплитуды этой формы колебаний  $A_2$  и  $A_3$  (см. рис. 1),  $A_1$  и  $A_2$  (см. рис. 2, а),  $A$  (см. рис. 2, б) определяются величиной синхронизирующего момента и жесткостью условной связи между агрегатами.

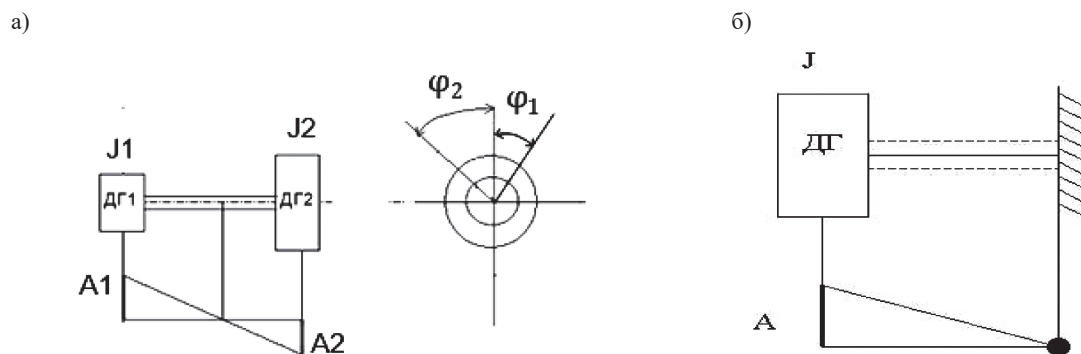


Рис. 2. Упрощенные крутильные схемы работы дизель-генератора:  
а — двухмассовая схема; б — одномассовая схема на мощную сеть

Наличие источника «возмущения» с частотой 2,8–3,4 Гц, из-за нестабильной работы топливной аппаратуры дизеля от цикла к циклу через рабочий процесс в цилиндрах, приводит к резонансным колебаниям в системе. В результате имеют место перетоки электрической мощности между параллельно работающими дизель-генераторами, а также сопровождающие это явление ухудшения качества работы и снижение показателей эффективности установок.

*Теоретические аспекты природы обменных колебаний.* Экспериментальным и расчетным путем был установлен не только источник возмущения, но и сама природа явлений в системе топливоподачи дизеля, приводящих к неудовлетворительной параллельной, а в ряде случаев и одиночной, работе дизель-генераторов [1, 2, 5, 6]. В исследованиях авторов [5–7] показано, что при вводе нескольких ДГ в параллельную работу образуется крутильная система, представленная на рис. 1. Объединив вращающиеся массы ДГ в одну, получим упрощенную двухмассовую систему, представленную на рис. 2). Эксперимент подтверждает данное представление о параллельной работе ДГ. Для ДГ, работающего на мощную сеть, можно составить дифференциальное уравнение движения первого порядка

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = c \varphi. \quad (1)$$

Здесь  $J$  — суммарный приведенный момент инерции роторов дизеля и генератора;

$c$  — жесткость условного упругого вала, эквивалентно заменяющая электрическую связь ДГ с мощной электрической сетью,

$$c = \frac{J_p G}{l},$$

где  $J_p$  — соответственно полярный момент инерции сечения условного вала;

$G, l$  — соответственно модуль упругости второго рода материала и длина условного вала.

Жесткость (электрическая) для условного вала выражается через электрический синхронизирующий момент  $M_s$ :

$$cd\varphi = t_{so} d\varphi,$$

где  $t_{so}$  — жесткость условной электрической связи, определяемая как  $t_{so} = \frac{M_s}{2}$ .

Жесткость электрической связи зависит от нагрузки (расчеты выполняются по формулам, предложенным И. Д. Урусовым). Решение уравнения (1) получим следующей подстановкой:

$$d\varphi = A \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;

$\alpha$  — фазовый угол (для идеальной системы  $\alpha = 90^\circ$ );

$\omega$  — круговая частота колебаний  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f_c$ ;

$T$  — период колебаний;

$f_c$  — собственная частота крутильных колебаний, Гц.

После преобразований (1) получим  $A \sin(\omega t + \alpha) \left[ \frac{J}{t_{so}} \omega^2 - 1 \right]$ . Далее имеем  $\omega = \sqrt{\frac{t_{so}}{J}}$ . Таким образом, собственная частота крутильных колебаний параллельно работающего с мощной сетью дизель-генератора с учетом принятых допущений

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{t_{so}}{J}}. \quad (3)$$

Так как значение  $t_{so}$  зависит от нагрузки, при изменении нагрузки величина  $f_c$  изменяется в определенном диапазоне. По материалам, полученным на стенде завода «Дальдизель» ДГР150/750, выполним проверку соответствия формулы (3) экспериментальным данным [6, 7]. Так, при замене штатного маховика с  $J = 171 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  маховиком судового дизеля с  $J = 68 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  для режима 25 %-й нагрузки  $f_c$  изменилась с 2,53 Гц до 3,75 Гц, т. е. в соотношении  $\frac{2,53}{3,75} = 0,674$ . Соотношение, полученное из формулы (3), равно 0,8, что находится в пределах точности эксперимента и обработки результатов. При параллельной работе ДГР 150/750 при  $J = 290 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  без нагрузки  $f_c = 2,05 \text{ Гц}$ ,  $t_{so}$ , по данным режима  $t_{so} = 60500 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ . Для режима 25 % имеем, соответственно, 2,53 Гц и 93500, для режима 100 % — 4,16 Гц и 283000, что также соответствует данным эксперимента.

*Математическое моделирование параллельной работы дизель-генераторов для применения в опытно-конструкторских работах в рамках исследуемой проблемы.* Для разнотипных дизель-генераторов следует принять схему на рис. 2. Тогда в системе уравнений динамического равновесия, эквивалентно замещающей два параллельно работающих ДГ, получим математическую модель параллельно работающих разнотипных ДГ:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d^2 d\varphi_1}{dt^2} + t_{so} (d\varphi_2 - d\varphi_1) = 0; \\ J_2 \frac{d^2 d\varphi_2}{dt^2} + t_{so} (d\varphi_1 - d\varphi_2) = 0. \end{cases}$$

Решение этих уравнений получим путем введения подстановок:

$$\begin{cases} d\varphi_1 = A_1 \sin(\omega t + \alpha); \\ d\varphi_2 = A_2 \sin(\omega t + \alpha). \end{cases}$$

Определим значение круговой частоты колебаний  $\omega$ , считая, что уравнения однородны относительно амплитуд  $A_1$  и  $A_2$ :

$$\omega'' = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} t_{so}}.$$

Определим соотношение амплитуд  $A_2 = -A_1 \frac{J_2}{J_1} \text{ и } f_A'' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} t_{so}}$  (верхние индексы

для схемы на рис. 2).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для устранения в системе параллельно работающих генераторов околорезонансных колебаний необходимо комплектовать судовую электростанцию двумя разнотипными ДГ.

Жесткость условной электрической связи при работе на мощную сеть в два раза больше, чем при параллельной работе двух ДГ. Поэтому соотношение собственных частот крутильных схем равно единице. Становится ясно, что параллельная работа двух одинаковых ДГ эквивалентна параллельной работе одного ДГ с мощной сетью. Следовательно, при заводских испытаниях ДГ целесообразно и экономически выгодно заменять два параллельно работающих ДГ одним, работающим на мощную сеть с утилизацией вырабатываемой энергии [6, 8, 9].

В условиях повышенных перетоков электрической энергии в околорезонансных режимах существенно возрастают величина  $M_3$  и собственная частота крутильной схемы. Таким образом,  $f_c$  возрастает вплоть до полного совпадения с частотой возмущающих сил  $f = n / 240$  Гц, где  $n$  — частота вращения ДГ. Таким образом, имеет место автоподстройка системы параллельно работающих ДГ на резонансный режим, что подтверждается экспериментально.

Вследствие геометрического и физического подобия ДГ и применения единой методики комплектования электрических установок на режимах малых нагрузок имеет место близость частоты субгармонического источника возмущения по линии топливной аппаратуры с собственной частотой крутильной схемы параллельно работающих ДГ. Знание собственной частоты проектируемого ДГ позволяет обеспечить рациональную комплектацию его составляющих компонентов, исключаящую околорезонансные колебания системы.

Существенно отличается соотношение частот вынуждающих сил и собственных колебаний системы в случае использования двухтактных дизелей, у которых частота вынуждающих сил равна  $f = n / 120$  Гц. Примером этого является параллельная работа двух дизель-генераторов с двухтактными дизелями типа 6Д19/21 Балаковского дизелестроительного завода.

### Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Представлены аспекты параллельной работы дизель-генераторов и определены возможные крутильные схемы для различных случаев, показаны подходы к определению параметров крутильной системы на основе экспериментального исследования.
2. Сформирована математическая модель для характерного случая эксплуатации и представлено ее решение.
3. В ходе проведения заводских испытаний дизель-генераторов целесообразно и экономически выгодно выполнять замену двух параллельно работающих дизель-генераторов одним, работающим на мощную сеть с утилизацией вырабатываемой энергии.
4. Реализация математической модели на вычислительных машинах явится мощным инструментарием для решения всех проблем обменных колебаний.
5. Соотношение частот вынуждающих сил и собственных колебаний системы в случае применения двухтактных приводных дизелей существенно отличается в лучшую сторону от полученного в случае применения четырехтактных приводных дизелей. Следовательно, целесообразным является возвращение к использованию двухтактных дизелей в качестве привода генераторов переменного тока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский Л. В. Управление параллельной работой современных судовых многогенераторных электростанций / Л. В. Вишневский, И. П. Козырев, А. Е. Савенко // Судовые энергетические установки. — 2007. — № 19. — С. 87–91.
2. Голубков Л. Н. Математическое моделирование рабочих процессов и шумообразования дизеля / Л. Н. Голубков, М. Г. Шатров, Л. А. Емельянов, К. П. Дьяконова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2006. — № 10. — С. 33–41. — EDN TXOKMV.



3. Марков В. А. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях / В. А. Марков, С. Н. Девянин, В. И. Мальчук. — Москва: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2007. — 360 с. — EDN VCQHNL.

4. Горелик Г. Б. К вопросу о «перетекании» электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов на долевых режимах нагрузки при резонансных колебаниях / Г. Б. Горелик, С. А. Жуков // Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: материалы международной конференции «Двигатели 2002». — Вып. 2. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. — С. 140–146.

5. Горелик Г. Б. Проблема обменных колебаний электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов на долевых нагрузках с точки зрения экономики и надежности / Г. Б. Горелик // Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: материалы международной конференции «Двигатели 2002». — Вып. 2. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. — С. 162–166.

6. Горелик Г. Б. Процессы топливоподачи в дизелях: природа межцикловой неустойчивости, моделирование и расчет / Г. Б. Горелик. — Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2015. — 246 с.

7. Кича Г. П. Полнопоточная комбинированная фильтрованием и центрифугированием тонкая очистка моторного масла в судовых дизелях / Г. П. Кича, Л. А. Семенюк // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 2. — С. 62–69. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-62-69. — EDN UOSWGO.

8. Кича Г. П. Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объёмным фильтрованием / Г. П. Кича, Л. А. Семенюк, М. И. Тарасов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1–2(47). — С. 105–112. — DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.075. — EDN UCDILA.

9. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. — New York: Springer, 2002. — 423 p.

## REFERENCES

1. Vishnevskiy, L. V., I. P. Kozyrev and A. E. Savenko. “Upravlenie parallel’noy rabotoy sovremennykh sudovykh mnogogeneratornykh elektrostantsiy.” *Sudovye energeticheskie ustanovki* 19 (2007): 87–91.

2. Golubkov, L. N., M. G. Shatrov, L. A. Emel’yanov and K. P. D’yakonova. “Matematicheskoe modelirovanie rabochikh protsessov i shumobrazovaniya dizelya.” *Bmstu Journal Of Mechanical Engineering* 10 (2006): 33–41.

3. Markov, V. A., S. N. Devyanin and V. I. Mal’chuk. *Vпрыскивание и распыливание топлива в дизелях* Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet im. N. E. Bauman, 2007: 360.

4. Gorelik, G. B. and S. A. Zhukov. “K voprosu o “peretekanii” elektricheskoy moschnosti pri parallel’noy rabote dizel’-generatorov na dolevykh rezhimakh nagruzki pri rezonansnykh kolebaniyakh.” *Aktual’nye problemy sozdaniya i ekspluatatsii kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii “DVIGATELI 2002”*. Vyp. 2. Khabarovsk: Izd-vo Khabar. gos. tekhn. un-ta, 2002: 140–146.

5. Gorelik, G. B. “Problema obmennykh kolebaniy elektricheskoy moschnosti pri parallel’noy rabote dizel’-generatorov na dolevykh nagruzkakh s tochki zreniya ekonomiki i nadezhnosti.” *Aktual’nye problemy sozdaniya i ekspluatatsii kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii “DVIGATELI 2002”*. Vyp. 2. Khabarovsk: Izd-vo Khabar. gos. tekhn. un-ta, 2002: 162–166.

6. Gorelik, G. B. *Protsessy toplivopodachi v dizelyakh: priroda mezhsiklovy nestabil’nosti, modelirovanie i raschet* Khabarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet, 2015: 246.

7. Kicha, G. P. and L. A. Semenyuk. “Full-flow combined by filtration and by centrifugation thin cleaning of motor oil in ship diesels.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2018): 62–69. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-62-69.

8. Kicha, G. P., L. A. Semenyuk and M. I. Tarasov. “Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk.” *Morskie intellektual’nye tekhnologii* 1–2(47) (2020): 105–112. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.075.

9. Ferziger, J.H., Peric M. *Computational Metods for Fluid Dynamics*. New York: Springer, 2002.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Анатолий Николаевич Соболенко** —  
доктор технических наук, профессор  
Морской государственный университет имени  
адмирала Г. И. Невельского  
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, д. 50а  
e-mail: [sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)  
**Геннадий Бенцианович Горелик** — доктор  
технических наук, профессор  
Морской государственный университет  
имени адмирала Г. И. Невельского  
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, д. 50а  
e-mail: [ggorelik@mail.ru](mailto:ggorelik@mail.ru)  
**Чистяков Александр Юрьевич** —  
кандидат технических наук  
Санкт-Петербургский Морской технический  
университет  
190121, город Санкт-Петербург,  
ул. Лоцманская, дом 3  
e-mail: [glucker2000@gmail.ru.com](mailto:glucker2000@gmail.ru.com)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Sobolenko, Anatoly N.** —  
Dr. of Technical Sciences, Professor  
Maritime State University named after admiral  
G. I. Nevelskoy  
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059,  
Russian Federation  
e-mail: [sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)  
**Gorelik, Gennady B.** —  
Dr. of Technical Sciences, Professor  
Maritime State University  
named after admiral G. I. Nevelskoy  
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059,  
Russian Federation  
e-mail: [ggorelik@mail.ru](mailto:ggorelik@mail.ru)  
**Chistyakov, Alexander Yu.** —  
Phd of Technical Sciences  
St. Petersburg Maritime Technical  
University, St. Petersburg  
3, Lotsmanskaya Ulitsa, Sankt-Peterburg, 190121,  
Russian Federation  
e-mail: [glucker2000@gmail.com](mailto:glucker2000@gmail.com)

*Статья поступила в редакцию 16 мая 2025 г.  
Received: May 16, 2025.*

## CALCULATION AND ANALYSIS OF RELATIVE ATOMIZATION CHARACTERISTICS OF DIESEL DISTILLATE AND LOW-VISCOSITY MARINE FUEL

**G. S. Yur, E. S. Gubin**

Siberian State University of Water Transport,  
Novosibirsk, Russian Federation

*The results of calculations of relative atomization characteristics for diesel distillate and low-viscosity marine fuel are presented. The analysis shows that, compared to diesel fuel, the atomization of low-viscosity marine fuel is characterized by greater non-uniformity and increased droplet size. This slows the combustion process and shifts heat generation to the expansion line. As a result, converting a diesel engine to low-viscosity marine fuel leads to increased specific consumption, exhaust gas temperature, and harmful emissions. To improve the operational properties of low-quality fuels, a method of preliminary treatment using a high-voltage electric charge was developed and implemented. Results of trial tests of a diesel engine running on modified fuel are presented. Based on the calculations and investigation of spray parameters, factors contributing to reduced efficiency of marine diesel engines when using heavy fuels were identified. A method for increasing energy efficiency and reducing the negative environmental impact of marine diesel engines operating on low-cost, low-quality fuel was proposed. This approach is both economically justified and environmentally efficient for improving the performance of marine diesel engines running on poor-quality heavy fuels and can be recommended for widespread use in the shipping industry.*

*Keywords: diesel fuel, low-viscosity marine fuel, differential and integral atomization characteristics, high-voltage electric charge.*

**For citation:**

Yur, Gennady S. and E. S. Gubin. "Calculation and analysis of relative atomization characteristics of diesel distillate and low-viscosity marine fuel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 592–598. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-592-598.

**УДК: 621.431.74–44**

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛИВАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДИСТИЛЛЯТНОГО И МАЛОВЯЗКОГО СУДОВОГО ТОПЛИВА

**Г. С. Юр, Е. С. Губин**

ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, Российская Федерация

*Представлены результаты расчета относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и маловязкого судового топлива. Анализ показал, что по сравнению с дизельным топливом распыливание маловязкого судового топлива отличается более высокой степенью неоднородности и увеличенным размером капель. Это затягивает процесс сгорания и смещает процесс тепловыделения на линию расширения. В результате при переводе дизеля на судовое маловязкое топливо повышаются его удельный расход, температура отработавших газов и вредные выбросы. Для улучшения эксплуатационных свойств низкосортных видов топлива разработан и осуществлен способ его предварительной обработки высоковольтным электрическим зарядом. Приведены результаты пробных испытаний дизеля на модифицированном топливе. На основе проведенных вычислений и изучения параметров распыления удалось установить факторы, приводящие к снижению эффективности работы судовых дизелей при использовании тяжелых видов топлива. В результате предложена методика повышения энергетической эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду судовых дизельных установок, эксплуатируемых на дешевом топливе низкого качества. Данная методика представляет собой экономически целесообразное и экологически эффективное решение для повышения эксплуатационных характеристик*

судовых дизельных установок, работающих на тяжелых видах топлива низкого качества, и может быть рекомендована для широкого применения в судоходной отрасли.

**Ключевые слова:** топливо дизельное, маловязкое судовое топливо, распыливание, дифференциальные и интегральные характеристики, высоковольтный электрический заряд, расход топлива, загрязняющие вещества, рабочий процесс дизеля, температура отработавших газов, процессы смесеобразования, качество распыливания.

**Для цитирования:**

Юр Г. С. Расчет и анализ относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и маловязкого судового топлива / Г. С. Юр, Е. С. Губин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 592–598. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-592-598. — EDN URLVIM.

### Введение (Introduction)

Более половины всех эксплуатационных расходов на судне приходится на приобретение топлива. Поэтому на речном флоте для среднеоборотных дизельных энергетических установок широкое применение получило маловязкое судовое топливо (СМТ), производимое по ТУ 38.101567–2005<sup>1</sup>. Эксплуатация судовых дизелей на таком топливе привела к ухудшению и повышению удельного расхода топлива, температуры отработавших газов и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Рабочий процесс дизеля условно можно представить в виде двух взаимосвязанных и взаимозависящих друг от друга физических и химических явлений: процессов смесеобразования и сгорания. Процессы смесеобразования также условно подразделяются на процессы макро- и микро-смесеобразования. Энергетические и экологические характеристики дизеля во многом зависят от качества распыливания и подготовки топливно-воздушной смеси, от которой зависят скорость и полнота и осуществления процесса сгорания [1].

Целью работы является расчет и анализ относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и судового маловязкого топлива.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Качество процесса распыливания оценивается по двум показателям: однородности и тонкости распыливания. Распыливание должно быть максимально тонким и однородным [2]. Для изучения относительных характеристик распыливания дизельными форсунками используются как экспериментальные, так и расчетные методы, основанные на полученных опытных данных. Экспериментальные исследования показали, что при распыливании под высоким давлением образуется конгломерат мелких капель, размеры которых меняются в широком диапазоне. Для оценки дисперсности капель топлива и качества распыливания в процессе расчетов используются *относительные характеристики* (дифференциальные и интегральные).

Определим и сравним относительные характеристики распыливания дизельными форсунками при работе на дизельном (ДТ) и судовом маловязком топливе (СМТ). Расчеты относительных характеристик исследуемых сортов топлива в невозмущенной воздушной среде выполнялись по зависимостям Розина и Раммлера [3, 4].

В качестве исходной точки для вычисления относительной величины капель различного диаметра используется следующее уравнение:

$$S = 1 - e^{-\left(\frac{z}{a_m}\right)^n}.$$

Здесь  $S$  — фракция суммарного объема капель, диаметр которых находится в диапазоне от минимального до заданного значения;

$a_m$  — параметр размера, применяемый в уравнении Розина – Раммлера;

<sup>1</sup> ТУ 38.101567–2005. Топливо маловязкое судовое. Технические условия. Магазин стандартов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.docum.ru/tu.asp?id=595697> (дата обращения: 17.04.2025).

$z$  — рассматриваемый диаметр капли;

$n$  — параметр, показывающий уровень однородности распыления.

Анализ относительных характеристик распыливания дизельного топлива и судового маловязкого топлива был выполнен с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного профессором С. А. Калашниковым [5].

Сравнительный анализ полученных характеристик дизельного и судового маловязкого топлива позволит определить одну из основных причин ухудшения процесса сгорания. Однако при этом необходимо учитывать, что характеристики распыления являются лишь одним из факторов, влияющих на эффективность сгорания и экологические показатели судового двигателя. Другие факторы, такие как конструкция камеры сгорания, турбулентность воздушного заряда, наддува и система управления подачей топлива, также играют не менее важную роль.

Для всестороннего анализа процесса тепловыделения важно учитывать не только характеристики топлива и распыления, но и особенности конструкции двигателя, а также условия его эксплуатации. Например, геометрия камеры сгорания оказывает непосредственное влияние на формирование факела пламени и интенсивность перемешивания топлива с воздухом. Оптимизация формы камеры сгорания может существенно повысить эффективность сгорания и снизить выбросы вредных веществ.

Турбулентность воздушного заряда, создаваемая завихрителями и другими элементами конструкции, также играет важную роль в обеспечении качественного перемешивания топлива и воздуха. Высокий уровень турбулентности способствует более быстрому и полному сгоранию топлива, что приводит к повышению эффективности двигателя и снижению выбросов. Система наддува, обеспечивающая подачу большего количества воздуха в цилиндры, позволяет сжигать большее количество топлива за один цикл, повышая мощность двигателя. Однако при этом необходимо тщательно контролировать соотношение топлива и воздуха, чтобы избежать образования сажи и других вредных веществ.

Система управления подачей топлива, включающая форсунки и электронный блок управления, играет ключевую роль в обеспечении оптимального впрыска топлива в цилиндры. Современные системы управления позволяют точно регулировать момент впрыска, его продолжительность и давление, что позволяет оптимизировать процесс сгорания в зависимости от условий эксплуатации двигателя. Поэтому для изучения и анализа процесса тепловыделения необходимо проводить комплексные исследования, учитывающие все факторы, рассмотренные в публикациях [6, 7].

## Результаты (Results)

Сравнительное исследование показало, что судовое маловязкое топливо (СМТ) демонстрирует несколько иные характеристики распыления по сравнению с дизельным топливом. В частности, наблюдается тенденция формирования более крупных капель при использовании СМТ, что может быть обусловлено его большей вязкостью и плотностью (данные приведены в таблице). Это, в свою очередь, может способствовать увеличению времени испарения и времени диффузионного горения.

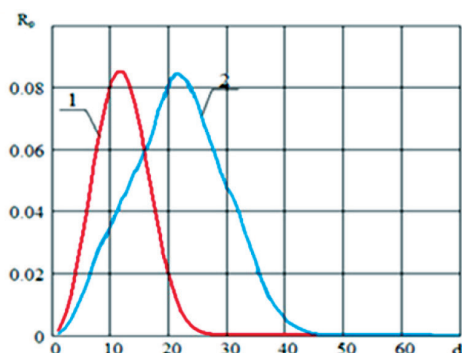
### Перечень параметров, которые были использованы при расчетах, относящихся к дизельному топливу и судовым маловязким видам топлива

| Вид топлива                | Плотность<br>$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> ; | Вязкость кинематическая<br>$\nu$ , м <sup>2</sup> /с; | Давление воздуха<br>$p$ , МПа |
|----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Дизельное топливо          | 0,845                                     | 0,00000361                                            | 3,5                           |
| Судовое маловязкое топливо | 0,860                                     | 0,00000675                                            | 3,5                           |

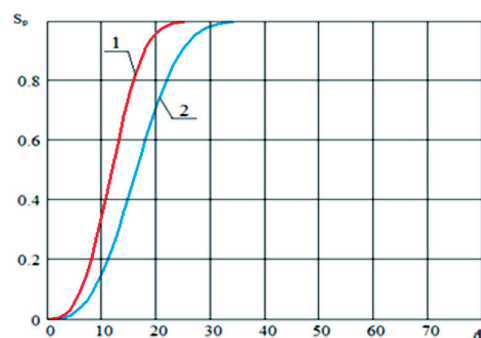
На рисунке *а* представлены графики дифференциальных характеристик распыливания исследуемых топлив, на рисунке *б* приведены интегральные характеристики распыливания топлива дизельной форсункой.



а)



б)



Относительные дифференциальные (а) и интегральные (б) характеристики распыливания топлива

Условные обозначения:

1 — топливо дизельное по ГОСТу 305–2013;

2 — судовое маловязкое топливо (СМТ) по ТУ 38.101567–87;

$d_k$  — размер капель, выраженный в микрометрах;

$S_p$  — доля совокупного объема капель, размер которых варьируется от наименьшего до рассматриваемого в общем объеме всех имеющихся капель;

$R_p$  — процентное соотношение объема капель, имеющих размер от минимального до заданного значения, к суммарному объему всех капель

При интерпретации графика необходимо учитывать, что более близкое расположение кривой распыливания (линия 1 на рисунке) к оси ординат свидетельствует о более тонком и однородном распыливании топлива. Соответственно, чем дальше кривая (линия 2 на рисунке) отстоит от оси ординат, тем распыливание характеризуется большей грубостью и неоднородностью.

### Обсуждение (Discussion)

В настоящее время основными направлениями комплексного улучшения энергетических и экологических характеристик дизелей является повышение давления впрыскивания (до 200–250 МПа и более) и применение микропроцессорного управления подачей топлива. Недостатком этих способов является необходимость внесения значительных изменений в конструкцию двигателей. Стоимость такого дизеля по сравнению с базовым двигателем увеличивается в 2–2,5 раза [8].

Для находящихся в эксплуатации дизелей относительно недорогими и легко осуществимыми являются способы дополнительной обработки низкокачественных видов топлива непосредственно на борту судна [9]. Для улучшения эксплуатационных свойств тяжелых сортов топлива используется эмульсия с водой [10, 11], ультразвуковая обработка [12], а также магнитные и электрические поля [13].

Сравнительный анализ характеристик дизельного топлива и СМТ показал, что судовое маловязкое топливо — более плотное и вязкое и содержит значительное количество тяжелых высокомолекулярных фракций. Для разрушения высокомолекулярных соединений, содержащихся в топливе, в лаборатории СДВС в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» была спроектирована, изготовлена и прошла успешные испытания опытная экспериментальная установка, в которой был использован высоковольтный электрический заряд. После обработки в установке плотность СМТ уменьшилась на 4 кг/м<sup>3</sup> при весьма незначительном увеличении кинематической вязкости (на 0,08 сСт) [14].

Пробные сравнительные стендовые испытания отсека Ч 10,5/12 показали, что при переводе двигателя с дизельного топлива на судовое маловязкое топливо удельный расход увеличился на 12–14 %. При переводе двигателя на СМТ, обработанном высоковольтным электрическим зарядом, расход топлива увеличился на 2–6 %. Температура отработавших газов при переводе

на базовое СМТ повысилась на 10–15°, а при переводе на обработанное топливо — на 0–5°. Дымность отработавших газов при работе на необработанном СМТ повысилась в 10 раз, а на модифицированном СМТ — в 2 раза [15].

Анализ полученных при расчете относительных характеристик распыливания показал, что с повышением плотности и вязкости топлива увеличиваются размеры капель. Топливо-воздушная смесь становится более грубой и неоднородной. Увеличивается масса капель и доля совокупного объема капель, размер которых варьируется от наименьшего до рассматриваемого. Область образования максимального количества капель сместилась с 12 мкм до 22 мкм. Область образования наиболее крупных капель сместилась с 25 мкм до 45 мкм.

В результате проведенного анализа сделан вывод о том, что при переводе с дистиллятного на судовое маловязкое топливо произойдут следующие негативные изменения:

- увеличится расстояние, пройденное вершиной топливной струи за определенный период времени, в результате часть капель будет оседать на стенках камеры сгорания в виде пленки;
- увеличится время горения крупных капель топлива, процесс тепловыделения сместится на линию расширения.

Указанные факторы приведут к увеличению удельного расхода топлива, температуры отработавших газов и количества вредных выбросов.

### **Заключение (Conclusion)**

Широкое использование на речном флоте судового маловязкого топлива обусловлено получением судовладельцами дополнительной прибыли за счет снижения его стоимости. На практике применение СМТ связано с ухудшением энергетических и экологических показателей двигателей.

Выполненные в работе расчеты и анализ относительных характеристик распыливания СМТ показали, что образующийся конгломерат капель получается более грубым и неоднородным, что является одной из основных причин смещения процесса сгорания на линию расширения. Это приводит к увеличению времени испарения топлива и ухудшению перемешивания топливовоздушной смеси, что в конечном итоге снижает эффективность сгорания и увеличивает выбросы вредных веществ. Более крупные капли топлива, попадая на стенки камеры сгорания, не успевают испариться и сгорают не полностью, образуя нагар и увеличивая тепловые потери.

Выполненное исследование позволяет выявить причины ухудшения рабочего процесса при работе на СМТ и предложить технологию улучшения энергетических и экологических показателей судовых дизелей, находящихся в эксплуатации при переводе их на дешевые низкокачественные сорта топлива.

В перспективе дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых методов распыливания СМТ, основанных на использовании инновационных технологий. Это позволит значительно улучшить характеристики распыла и обеспечить более эффективное и экологически чистое сгорание данного типа топлива.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Губин Е. С. Результаты испытаний отсека дизеля ч 10,5/12 на топливе с газовой водородосодержащей присадкой / Е. С. Губин, И. В. Швецов, Г. С. Юр, А. С. Дмитриев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2025. — № 1(411). — С. 135–142. — EDN WIIICZC.
2. Юр Г. С. Исследование процесса микросмесеобразования в возмущенной газовой среде при различных давлениях впрыскивания топлива / Г. С. Юр, Е. С. Губин, А. С. Дмитриев // Транспортное дело России. — 2025. — № 3. — С. 151–154. — EDN MADVHU.
3. Лышевский А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А. С. Лышевский. — М: Машгиз, 1963. — 180 с.
4. Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях / А. С. Лышевский. — Л.: Судостроение, 1971. — 245 с.

5. Калашников С. А. Численное исследование влияния некоторых параметров рабочего процесса дизеля на выбросы оксидов азота / С. А. Калашников // Дизельные энергетические установки речных судов. — Новосибирск: Изд-во НГАСВТ, 2005. — С. 7–13.

6. Покусаев М. Н. Моделирование образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля многотопливных систем / М. Н. Покусаев, А. Ю. Грабарчук, Т. В. Хоменко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500. — EDN HVFSIL.

7. Ерофеев П. А. Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774. — EDN JQBJAN.

8. Новиков Л. А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей / Л. А. Новиков // Двигателестроение. — 2002. — № 2. — С. 23–27.

9. Губин Е. С. Исследование вредных выбросов судового дизеля при работе на топливе с газовой присадкой, содержащей водород / Е. С. Губин, Г. С. Юр, И. В. Швецов, С. В. Титов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2025. — № 2. — С. 107–113. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-107-113. — EDN SLAWVT.

10. Лебедев О. Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / О. Н. Лебедев, В. А. Сомов, В. Д. Синин. — Л: Судостроение, 1988. — 105 с.

11. Zhang, T. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels / T. Zhang, H. Okada, T. Tsukamoto, K. Ohe // Paper № 193. — Vienna: CIMAC, 2007.

12. Пивоварова Н. А. Улучшение свойств судового топлива ультразвуковой обработкой / Н. А. Пивоварова, Ю. Ш. Байрамова, Г. В. Власова // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 842–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848. — EDN UFGUGG.

13. Вердиев М. Г. Оценка размеров ультрадисперсных частиц жидкостей, распылённых в электрическом поле / М. Г. Вердиев, М. К. Гусейнов, Ш. Ш. Набиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2015. — № 1(36). — С. 17–23. — EDN TSNBRV.

14. Губин Е. С. Исследование характеристик модифицированного судового маловязкого топлива / Е. С. Губин, Г. С. Юр // Сибирский научный вестник Новосибирский научный центр Ноосферные знания и технологии Российской Академии естественных наук. Вып. XIV. — Новосибирск: Изд. СГУВТ, 2020. — С. 16–19.

15. Викулов С. В. Результаты сравнительных испытаний двигателя на дизельном и судовом маловязком топливе / С. В. Викулов, Е. С. Губин, И. Г. Мироненко [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–4(42). — С. 125–128. — EDN YXSDJJ.

## REFERENCES

1. Gubin, E. S., I. V. Shvetsov, G. S. Yur and A. S. Dmitriev. “Test results of compartment ch 10.5/12 on diesel fuel with gas hydrogen additive.” *Transactions Of The Krylov State Research Centre* 1(411) (2025): 135–142.

2. Yur, G. S., E. S. Gubin and A. S. Dmitriev. “Study of the process of micromixture formation in a disturbed gaseous environment at various fuel injection pressures.” *Transport Business Of Russia* 3 (2025): 151–154.

3. Lyshevskiy, A. S. *Protsessy raspylivaniya topliva dizel'nyimi forsunkami* M: Mashgiz, 1963: 180.

4. Lyshevskiy, A. S. *Raspylivanie topliva v sudovykh dizelyakh* L: Sudostroenie, 1971: 245.

5. Kalashnikov, S. A. “Chislennoe issledovanie vliyaniya nekotorykh parametrov rabocheho protsessa dize-lya na vybrosy oksidov azota.” *Dizel'nye energeticheskie ustanovki rechnykh sudov*. Novosibirsk: Izd-vo NGAVT, 2005: 7–13.

6. Pokusaev, M. N., A. Yu. Grabarchuk and T. V. Khomenko. “Simulation of the harmful emissions formation in the exhaust gases of marine diesel of multi-fuel systems.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500.

7. Erofeev, P. A., V. A. Zhukov and S. G. Chernyy. “Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

8. Novikov, L. A. "Osnovnye napravleniya sozdaniya malotoksichnykh transportnykh dvigateley." *Dvigatelstroenie* 2 (2002): 23–27.
9. Gubin, E. S., G. S. Yur, I. V. Shvetsov and S. V. Titov. "Study of harmful emissions of a marine diesel when operating on fuel with a gas additive containing hydrogen." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2025): 107–113. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-107-113.
10. Lebedev, O. N., V. A. Somov and V. D. Sisin. *Vodotoplivnye emul'sii v sudovykh dizelyakh* L: Sudostroyeniye, 1988: 105.
11. Zhang, T., H. Okada, T Tsukamoto and K. Ohe "Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels." *Paper No. 193*. Vienna: CIMAC, 2007.
12. Pivovarova, N. A., Yu. Sh. Bayramova and G. V. Vlasova. "Improving the properties of marine fuel by ultrasonic processing." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.6 (2021): 842–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848.
13. Verdiev, M. G., M. K. Guseynov and Sh. Sh. Nabiev. "Assessment of the sizes of nanolarge-scale particles of the liquids sprayed in electric field." *Herald Of Daghestan State Technical University. Technical Sciences* 1(36) (2015): 17–23.
14. Gubin, E. S. and G. S. Yur. "Issledovanie kharakteristik modifitsirovannogo sudovogo malovyazkogo topliva." *Sibirskiy nauchnyy vestnik Novosibirskiy nauchnyy tsentr Noosfernye znaniya i tekhnologii Rossiyskoy Akademii estestvennykh nauk. Vyp. XIV*. Novosibirsk: Izd. SGUVT, 2020: 16–19.
15. Vikulov, S. V., E. S. Gubin and I. G. Mironenko et al. "Results of comparative engine tests with diesel and marine low-viscosity fuel." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 4–4(42) (2018): 125–128.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Юр Геннадий Сергеевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630099, Российская Федерация, г. Новосибирск,  
ул. Щетинкина, 33  
e-mail: [smf@nsawt.ru](mailto:smf@nsawt.ru)  
**Губин Евгений Сергеевич** —  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
Судовых энергетических установок ФГБОУ ВО  
«СГУВТ»  
630099, Российская Федерация, г. Новосибирск,  
ул. Щетинкина, 33  
e-mail: [e.v.gubin@nsawt.ru](mailto:e.v.gubin@nsawt.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yur, Gennady S.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Siberian State University of Water Transport  
33 Schetinkina St., Novosibirsk, 630099,  
Russian Federation  
e-mail: [smf@nsawt.ru](mailto:smf@nsawt.ru)  
**Gubin, Evgeny S.** —  
PhD, associate professor of the Department of Marine  
Power Plants  
Siberian State University of Water Transport  
33 Schetinkina St., Novosibirsk, 630099,  
Russian Federation  
e-mail: [e.v.gubin@nsawt.ru](mailto:e.v.gubin@nsawt.ru)

Статья поступила в редакцию: 19 июня 2025 г.  
Received: June 19, 2025.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-599-612

EDN URSIRN

## SYNTHESIS AND MODELING OF THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM ELECTRIC DRIVE WITH REFERENCE MODEL NEURAL REGULATOR

**V. V. Saharov, A. A. Chertkov, Ya. N. Kask,**

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

*The purpose of this work is to implement intelligent algorithms for the synthesis of control systems for electric drives of power supply systems at water transport facilities using artificial neural networks. The use of such intelligent algorithms will make it possible to carry out in practice the digital transformation of hardware units of regulators (controllers) in control systems for various objects, including electric drives, into mathematical algorithms based on neural network controllers. Such controllers, for example, those using a reference model, are more preferable when controlling nonlinear objects, since the neural networks on which they are based are nonlinear. In view of this, the scope of their application has been significantly expanded in the further development of methods for computer monitoring and parametric identification of ship and shore power supply management models, as well as the analysis and forecasting of energy efficiency indicators of their operating modes. The procedure for synthesizing a neural network regulator built on the basis of a reference model to stabilize the angular velocity of a DC motor is considered, aiming to compensate for oscillations occurring in the drive control loop. Using a PID tuner, the parameters of the PID controller were determined, significantly affecting control quality and allowing it, together with a typical first-order astatic link, to perform the function of a reference regulator for training the neural network controller. It is shown that the selected parameters of the neural model of the controlled object and the neural network reference regulator made it possible to significantly improve the quality of the transient process and eliminate oscillations in the DC motor drive control. The indicators and characteristics of the training quality of the neural network regulator and the neural model of the object with the selected training parameters are presented. An algorithm for training the neural model of the controlled object and the neural network regulator based on the dynamic nature of the backpropagation of error deviations of output signal values from reference ones in a multilayer neural network is proposed, with the purpose of correction through introducing adjustments to the values of synaptic weight coefficients. The algorithm can be applied in control systems for electric drives of unmanned objects, including aircraft, waterborne, and land-based systems in inland water transport.*

*Key words: algorithm, parametric identification, consumption characteristics, neural networks, network technologies, approximation, parameter estimation.*

### For citation:

Saharov, Vladimir V., A. A. Chertkov and Ya. N. Kask. "Synthesis and modeling of the electric drive control system based on the reference model of the neural regulator." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 599–612. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-599-612.

УДК. 621.398.04

## СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ НЕЙРОННОГО РЕГУЛЯТОРА

**В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Я. Н. Каск,**

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



Целью работы является реализация интеллектуальных алгоритмов синтеза систем управления электроприводами систем энергоснабжения на объектах водного транспорта с использованием искусственных нейронных сетей. Использование подобных интеллектуальных алгоритмов позволит на практике осуществлять цифровую трансформацию аппаратных узлов регуляторов (контроллеров) в системах управления различными объектами, в том числе электроприводами, в математические алгоритмы, базирующиеся на нейросетевых контроллерах. Такие контроллеры, например, с использованием эталонной модели, являются более предпочтительными при управлении нелинейными объектами, поскольку нейросети, на которых они базируются, нелинейны. В связи с этим существенно расширена область их применения в дальнейшем развитии методов компьютерного мониторинга и параметрической идентификации моделей судовых и береговых объектов управления энергоснабжением, а также анализа и прогнозирования показателей энергоэффективности их режимов работы. Рассмотрена процедура синтеза нейросетевого регулятора, построенного на основе эталонной модели, для стабилизации угловой скорости вращения двигателя постоянного тока с целью компенсации колебаний, возникающих в контуре управления приводом. С использованием PID-тюнера определены параметры PID-регулятора, существенно влияющие на качество управления и позволившие ему в составе с типовым астатическим звеном первого порядка выполнять функции эталонного регулятора для обучения нейросетевого регулятора. Показано, что выбранные параметры нейронной модели объекта управления и нейросетевого эталонного регулятора позволили существенно улучшить показатели качества переходного процесса и устранить колебания в приводе управления двигателя постоянного тока. Приведены показатели и характеристики качества обучения нейросетевого регулятора и нейронной модели объекта при выбранных параметрах обучения. Предложен алгоритм обучения нейронной модели управляемого объекта и нейросетевого регулятора модели, базирующийся на динамическом характере обратного распространения ошибки отклонений значений выходных сигналов от эталонных в многослойной нейронной сети с целью ее коррекции за счет введения поправок в значения весовых коэффициентов синаптических связей. Алгоритм может быть применим в системах управления электроприводами безкипажных объектов, как летательных, так водного и наземного базирования, на внутреннем водном транспорте.

Ключевые слова: алгоритм, параметрическая идентификация, расходная характеристика, нейронные сети, сетевые технологии, аппроксимация, оценка параметров.

#### Для цитирования:

Сахаров В. В. Синтез и моделирование системы управления электроприводом на основе эталонной модели нейронного регулятора / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Я. Н. Каск // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 599–612. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-599-612. — EDN URSIRN.

### Введение (Introduction)

В условиях цифровой трансформации открываются новые возможности для удовлетворения возрастающих требований к характеристикам электроэнергетических систем и объектов управления на водном транспорте, что позволяет обеспечить повышение надежности их работы за счет замены аппаратных средств этих систем интеллектуальными (математическими) алгоритмами с использованием высокотехнологичных узлов специализированной вычислительной техники, например, нейропроцессорами. Использование компьютерных технологий и роботизированных систем на основе искусственного интеллекта в управлении энергетическими системами объектов морского и речного флота является важнейшей задачей цифровизации в судостроении и на предприятиях отрасли [1]–[3]. Цифровизация отрасли водного транспорта предполагает максимальное использование систем искусственного интеллекта (нейропроцессоров) не только в технологии проектно-конструкторских работ и производстве конечного продукта, в частности, электропривода [4], но также в мониторинге и диагностировании его параметров, не подлежащих измерениям с применением аппаратных средств в период штатной эксплуатации.

В последнее десятилетие существенно повысился интерес к применению искусственных нейронных сетей для решения задач обработки, распознавания, идентификации, а также оптимального управления с применением нейросетевых регуляторов. Это объясняется стремительным развитием технологий искусственного интеллекта и нейропроцессоров, обеспечивающих возможность управления сложными нелинейными объектами, так как используемые ими нейросети нелинейны по своей природе. Кроме того, нейросетевые методы управления объектами, в отличие

от классических методов, в результате их способности к обучению и самообучению применимы для адаптивного управления объектами при вариации их параметров и условиях эксплуатации. В частности, в электроэнергетике, адаптивное управление на основе нейросетевого регулятора позволяет решать актуальную задачу обеспечения робастной устойчивости управления электроприводами, что позволяет в точности отслеживать сигнал задатчика и компенсировать колебания, возникающие в контуре управления приводом [5].

Эффективность мониторинга, прогнозирования и оптимального управления приводами электроэнергетических систем с целью экономии энергоресурсов может быть повышена с применением искусственных нейронных сетей, моделирующих адаптируемые и обучаемые процессы распределенных мультипроцессорных систем, ассоциируемые с нейросетевыми процессами человеческого мозга [6], [7].

Нейросетевые процессы в синаптических связях многослойной сети между нейронами за счет массового параллелизма их работы значительно ускоряют обработку информации, обеспечивая вычисления с требуемой точностью. В отличие от известных технологических процессов они не программируются, а обучаются. Одной из известных структур нейросетевых регуляторов в составе инструментария NN Toolbox Simulink среды MATLAB является регулятор, использующий эталонную (reference) модель, в соответствии с которой с помощью нейронных сетей регулятора и объекта управления, а также набора данных для их обучения осуществляется настройка (по ошибке рассогласования) управляемого объекта, т. е. реализуется адаптивное управление. На основе результатов обучения и моделирования нейросетевых моделей регулятора и объекта получены ожидаемые характеристики качества переходного процесса на выходе системы [8], [9].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Использование эталонной модели в регуляторах позволяет осуществлять самонастройку систем, в которых управление осуществляется посредством прямого адаптивного подхода, способных настраиваться автоматически. Определяющую роль в таких системах играют контуры адаптации или самонастройки по эталонной модели, от числа которых зависит размерность вектора переменных состояния, а также устойчивость, робастность и динамика замкнутой системы. Структура нейросети с эталонным регулятором и объектом управления приведена на рис. 1 [10].

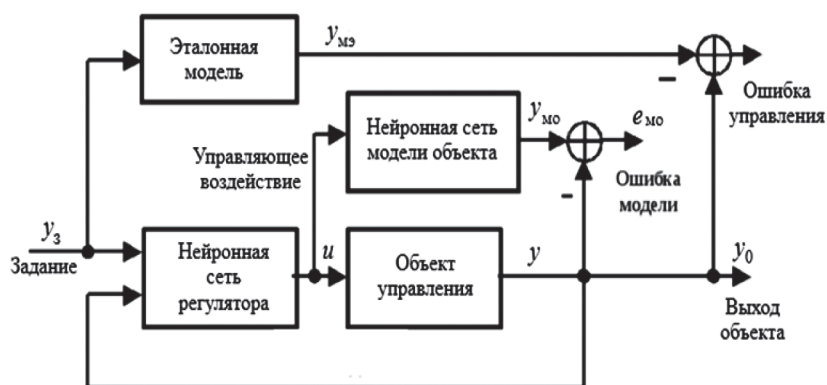


Рис. 1. Структура нейросети с эталонным регулятором и объектом управления

Как видно из схемы, ее основу составляет эталонная модель, отклик (реакция)  $y_{mz}$  которой на входное (задающее) воздействие  $u_z$  в виде единичного ступенчатого сигнала в установившемся режиме в точности ему соответствует. Для формирования желаемого отклика  $y_{mz}$  используют модели типовых динамических звеньев первого или второго порядков, которые могут быть интегрированы с ПИД-регуляторами [10]. В этом случае для эффективной настройки объекта по эталону интегрированная нейросеть адаптивной системы должна включать нейросети регулятора и модели объекта с контурами их настройки с помощью обратных связей. В результате настройки

по ошибке рассогласования выходов объекта и эталона выполняется непрерывная коррекция параметров системы в ответ на изменения внешних и внутренних условий. Нейросетевая структура системы управления с эталонной моделью, построенная в среде моделирования SIMULINK MATLAB, представлена на рис. 2.

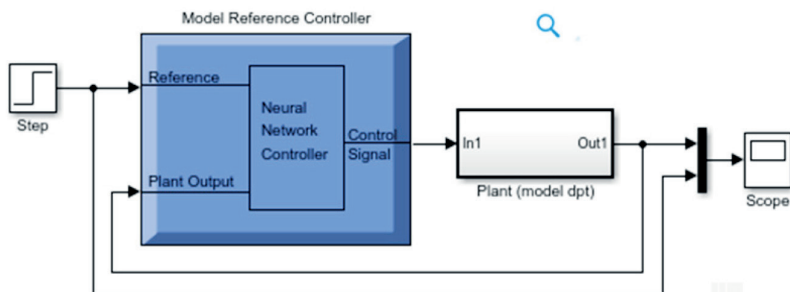


Рис. 2. Simulink-модель системы адаптивного управления объектом

Из данного рисунка видно, что Simulink-модель нейросетевой системы адаптивного управления содержит блок контроллера Model Reference Control и объект идентификации Plant Model, интегрированный в блоке Subsystem, имеющем входной In и выходной Out порты. Рассмотрим их состав и характеристики.

**Модель нелинейного объекта управления (Plant Model).** В качестве нелинейного объекта управления выберем электропривод двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением. Синтез и моделирование электропривода требуют его математическую описания. Основой для построения математической модели ДПТ служит система дифференциальных уравнений (СДУ), которая адекватно описывает его переходные процессы. Кроме того, такой подход позволяет исследовать и статические режимы в виде установившихся процессов, при которых производные функций равны нулю. Для математического описания работы любого электропривода необходимо составить его электрическую схему замещения, из которой по законам Кирхгофа можно записать уравнения электрического равновесия контуров как подвижной, так и неподвижной частей электрической машины. Пример такой схемы замещения для привода ДПТ приведен на рис. 3.

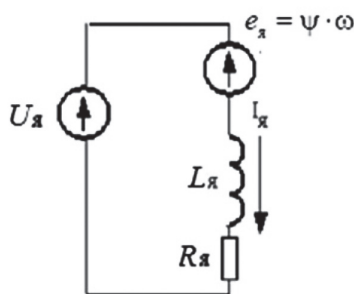


Рис. 3. Электрическая схема замещения ДПТ

Математическая модель электрической машины (ЭМ) любого типа состоит из уравнений электрического равновесия всех контуров ЭМ и уравнения движения ротора.

Будем считать, что все параметры схемы замещения — постоянные величины, в том числе магнитный поток  $\psi$ , замыкающийся между разноименными полюсами машины (поток полюсов для ДПТ независимого возбуждения). Уравнение равновесия по второму закону Кирхгофа:

$$U_{\text{я}} = e_{\text{я}} + i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} = e_{\text{я}} + i_{\text{я}} R_{\text{я}} + T_{\text{я}} R_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt},$$

где  $U_{\text{я}}$  — напряжение источника питания, подаваемое на электрическую часть якоря двигателя;

$e_{\text{я}} = \psi \cdot \omega$  — ЭДС, наводимая в обмотке якоря при пересечении проводников потока  $\psi$ , создаваемого неподвижными полюсами;

$i_{\text{я}}$  — электрический ток в якорной цепи;

$R_{\text{я}}$  — полное электрическое сопротивление якорной цепи, включая сопротивление дополнительных полюсов и щеток;

$L_{\text{я}}$  — индуктивность якорной цепи;

$T_{\text{я}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$  — постоянная времени якорной цепи;

Уравнение движения для механической части:

$$M_e - M_c = T_j \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_e = \psi \cdot i_{\text{я}}$ ,  $M_c$  — электромагнитный и статический моменты;

$\omega$  — скорость вращения якоря;

$T_j$  — инерционная постоянная времени двигателя.

В канонической форме Коши математическая модель в пространстве состояний имеет вид:

$$\frac{di_{\text{я}}}{dt} = (U_{\text{я}} - e_{\text{я}} - i_{\text{я}} R_{\text{я}}) \frac{1}{L_{\text{я}}};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (m - m_c) \frac{1}{T_j}.$$

Записав полученные уравнения в операторной форме, передаточные функции между напряжением, током, моментом и скоростью будут иметь следующий вид:

$$W_i(s) = \frac{I_{\text{я}}(s)}{U_{\text{я}}(s) - e_{\text{я}}(s)} = \frac{1}{T_{\text{я}} + 1};$$

$$W_{\omega} = \frac{\omega(s)}{M_e(s) - M_c(s)} = \frac{1}{T_j s}.$$

Эти передаточные функции положим в основу структурной схемы модели ДПТ, представленной на рис. 4.

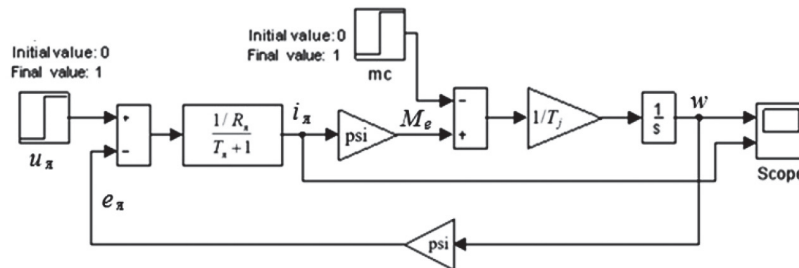


Рис. 4. Структурная схема модели ДПТ

Зададимся следующими параметрами модели ДПТ:  $R_{\text{я}} = 0,107$  Ом,  $T_{\text{я}} = 0,034$  с,  $T_j = 0,72$  с. Структура модели ДПТ с указанными параметрами в Simulink MATLAB будет иметь вид, представленный на рис. 5.

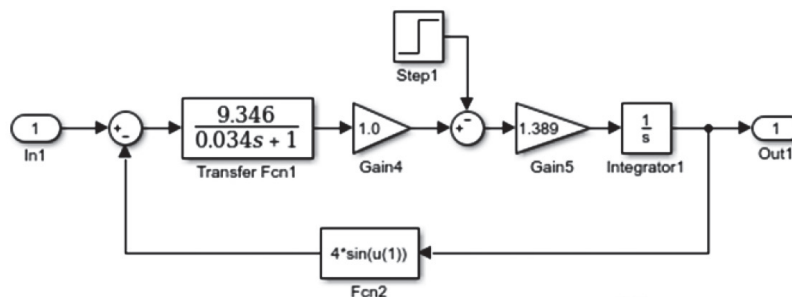


Рис. 5. Simulink-модель ДПТ

Поскольку целью работы является синтез нейросетевого регулятора, назначением которого является подавление колебаний, возникающих в контуре управления объекта, и обеспечение требуемого уровня выходного сигнала, в контур объекта управления (обратной связи) внесен функциональный блок Fcn 2, который придает переходному процессу на выходе объекта колебательный характер (рис. 6).

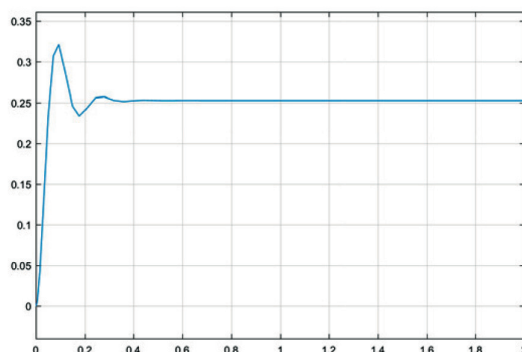


Рис. 6. Переходный процесс на выходе Simulink-модели ДПТ

Как видно из характеристики переходного процесса на рис. 6, величина перерегулирования, составляющая 32 %, превышает принятое допустимое значение 10 %.

**Регулятор на основе эталонной модели.** При управлении на основе эталонной модели регулятор — это нейронная сеть, которая обучена управлять процессом так, чтобы он отслеживал поведение эталонного процесса. При этом модель управляемого процесса активно используется при настройке параметров самого регулятора. Эталонная Simulink-модель нейронного регулятора представлена на рис. 7.

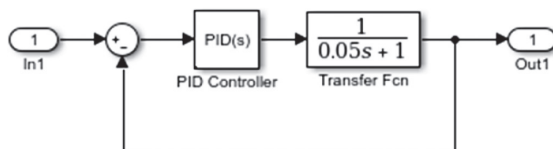


Рис. 7. Simulink-модель эталонного нейросетевого регулятора с ПИД-контроллером

Регулятор на основе эталонной модели представляет собой типовое астатическое звено первого порядка, которое для получения желаемой характеристики переходного процесса (рис. 7) дополнено ПИД-регулятором, параметры которого (рис. 8) получены с помощью PID Tuner [12].

| Controller Parameters      |                     |                      |
|----------------------------|---------------------|----------------------|
|                            | Tuned               | Block                |
| P                          | 1.103               | 1                    |
| I                          | 26.477              | 1                    |
| D                          | 0                   | 0                    |
| N                          | 100                 | 100                  |
|                            |                     |                      |
|                            |                     |                      |
| Performance and Robustness |                     |                      |
|                            | Tuned               | Block                |
| Rise time                  | 0.0815 seconds      | 3.17 seconds         |
| Settling time              | 0.126 seconds       | 6.36 seconds         |
| Overshoot                  | 0.594 %             | 0 %                  |
| Peak                       | 1.01                | 0.998                |
| Gain margin                | Inf dB @ NaN rad/s  | Inf dB @ NaN rad/s   |
| Phase margin               | 84.8 deg @ 24 rad/s | 155 deg @ 4.47 rad/s |
| Closed-loop stability      | Stable              | Stable               |

Рис. 8. Параметры настройки ПИД-регулятора с помощью PID Tuner MATLAB



Характеристика переходного процесса эталонной модели регулятора с параметрами, приведенными на рис. 8, представлена на рис. 9.

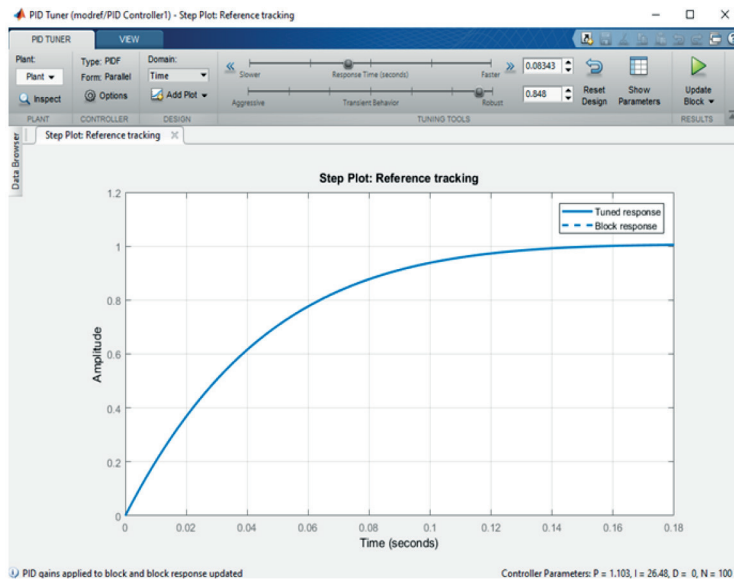


Рис. 9. Желаемая переходная характеристика эталонной модели регулятора

Архитектура регулятора с эталонной моделью требует обучения нейронной сети управляемого процесса и нейронной сети регулятора. При этом обучение регулятора оказывается достаточно сложным, поскольку оно основано на динамическом варианте метода обратного распространения ошибки, так как нейронная сеть использует линии задержки.

**Обучение нейронной сети с эталонным регулятором.** Для того чтобы начать работу, необходимо активизировать блок Model Reference Controller (см. рис. 2) двойным щелчком левой кнопки мыши. Появится окно, показанное на рис. 10.

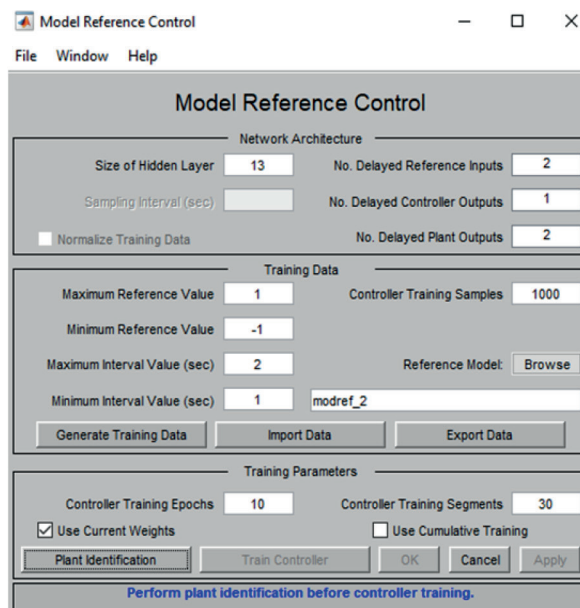


Рис. 10. Окно обучения нейронной сети регулятора

Особенность рассматриваемой системы управления заключается в том, что следует построить две нейронные сети: модели объекта управления и самого регулятора. Архитектуру нейрон-

ной сети регулятора (см. рис. 10), имеющую два слоя, можно описать профилем 2–13–1 (два входа, 13 нейронов скрытого слоя и один выход).

Следующим шагом является обучение модели объекта идентификации путем выбора кнопки **Plant Identification** в окне, показанном на рис. 10. При этом откроется окно **Plant Identification** (Объект идентификации), в котором устанавливаются выбранные параметры нейронной сети модели объекта управления (рис. 11). Линии задержки, используемые для формирования входов нейронных сетей, имеют такт дискретности, равный 0,05 с. Число циклов обучения задается параметром **Training Epochs**.

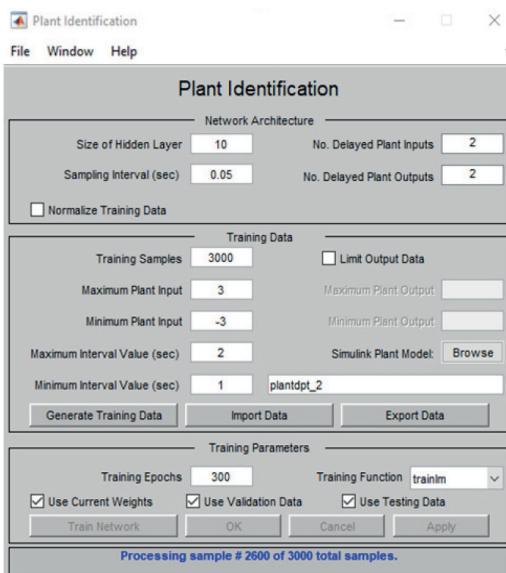


Рис. 11. Окно обучения нейронной сети модели объекта управления

Для запуска процесса обучения нейронной модели объекта идентификации следует создать набор обучающих данных. С этой целью выбирается кнопка **Generate Training Data**, после чего программа начинает генерировать данные для обучения контроллера. По окончании обучения в окне **Plant Input-Output Data** откроются графики (рис. 12).

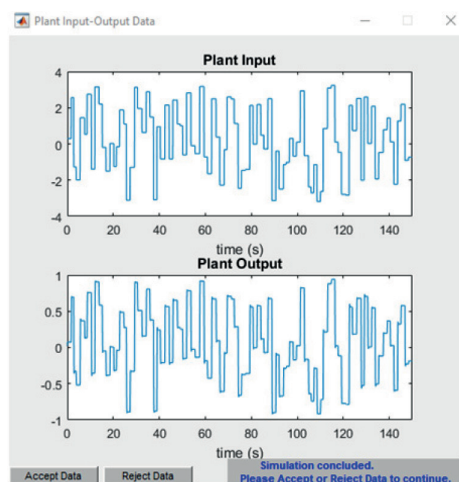


Рис. 12. Сигналы входа и выхода нейронной модели объекта после обучения

После того как будут сгенерированы данные, необходимо подтвердить выполненную процедуру идентификации. Если построенные графики **Plant Input** и **Plant Output** удовлетворяют сге-

нерированным данным, то для подтверждения результатов идентификации (см. рис. 12), следует нажать кнопку **Accept Data** (*Принять данные*), в противном случае выбирается кнопка **Reject Data** (*Отвергнуть данные*) для ввода новых данных.

Следующим шагом является запуск кнопкой **Train Network** окна **Plant Identification** процесса обучения нейронной модели объекта нейроконтроллером. По окончании обучения его результаты можно увидеть, открыв графики **Performance** (рис. 13), **Training State** и **Regression**, которые создаются нажатием соответствующих кнопок в окне **Neural Network Training** (Nntraintool) — рис. 14. В том же окне приведена структура нейронной сети объекта идентификации с профилем 2–10–1 (два входа, 10 нейронов скрытого слоя и один выход).

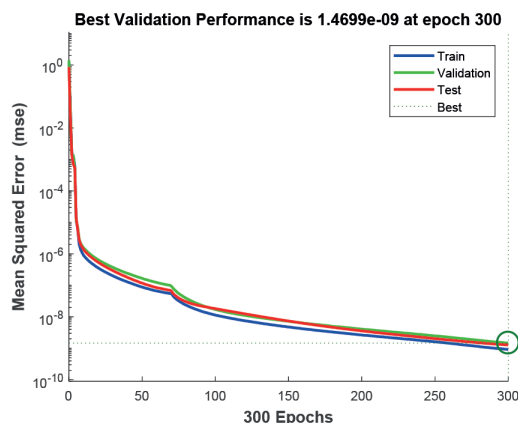


Рис. 13. Характеристики производительности процесса обучения нейросети объекта

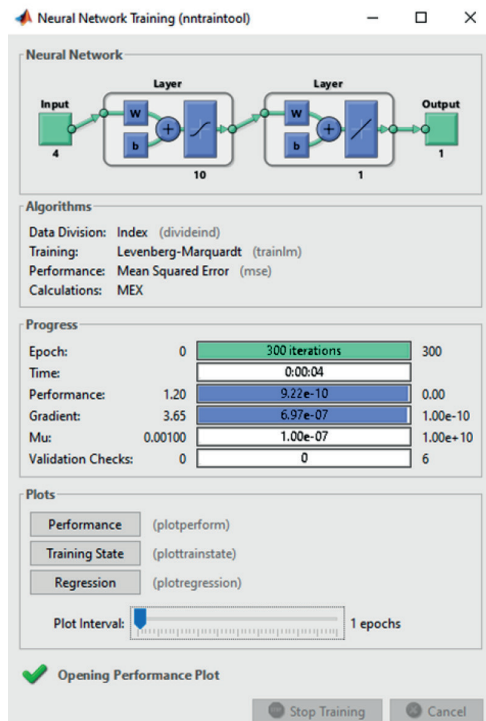


Рис. 14. Архитектура нейронной сети объекта идентификации

Если сходимость и точность характеристик производительности (см. рис. 13) соответствуют наилучшему значению, то результаты обучения сохраняются нажатием кнопки **Apply** или **OK** в окне **Plant Identification**.

Далее начинается настройка регулятора через интерфейс **Model Reference Control** (см. рис. 10) посредством подготовки данных обучения, для генерации которых необходимо нажать кнопку **Generate Training Data**. Если построенные графики (рис. 15) реакции и воздействия эталонной модели **Reference Model Output** соответствуют данным настройки, то нажатием кнопки **Accept Data** под графиками переходим к его обучению.

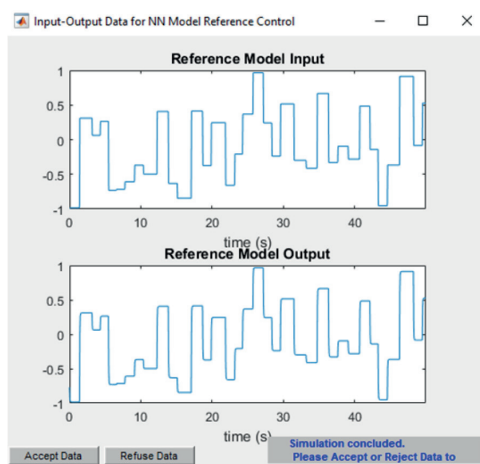


Рис. 15. Графики воздействия и реакции на нее эталонной модели нейронного регулятора

Полученные данные для обучения нейросетевого регулятора можно экспортировать в **Workspace** или в *m*-файл, воспользовавшись для этого кнопкой **Export Data**.

Далее нажатием кнопки **Train Controller** запускаем процесс обучения нейросетевого регулятора. После того как обучение будет окончено, графики выходов эталонной модели и объекта управления выводятся на экран (рис. 16). Результаты обучения можно посмотреть, открыв графики **Performance** (рис. 17), **Training State** и **Regression** — в окне (рис. 18) **Neural Network Training** (nntraintool), которые создаются нажатием соответствующих кнопок.

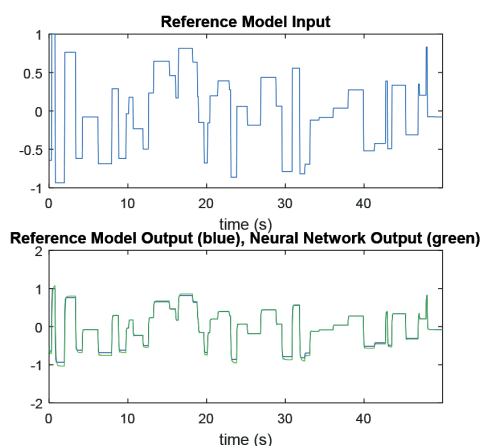


Рис. 16. Сигналы выходов эталонной модели и объекта управления

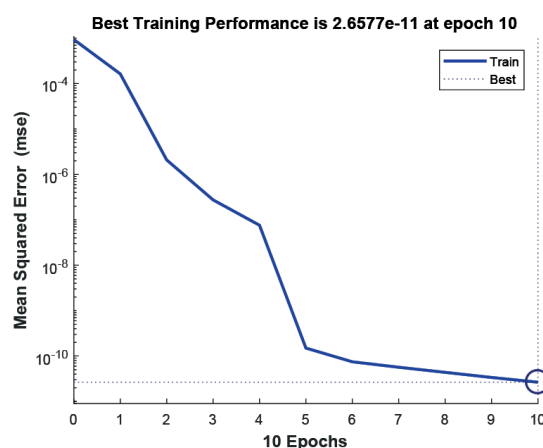


Рис. 17. График изменения средней квадратической ошибки слежения

Если точность слежения за эталонной моделью неудовлетворительна (см. рис. 17), то можно продолжить обучение регулятора с тем же набором данных, снова воспользовавшись кнопкой **Train Controller**. В противном случае можно повторить набор данных с помощью кнопки **Generate Data** или продолжить обучение с новыми весами, выбрав вкладку **Use Current Weights**. В случае соответствия ее наилучшему значению результаты обучения сохраняются нажатием кнопки **Apply** или **OK** в окне **Model Reference Control**.

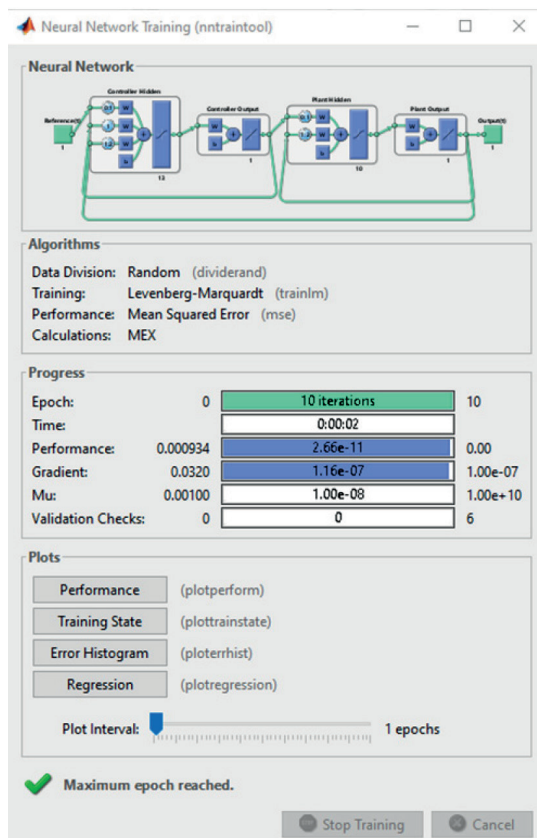


Рис. 18. Структура нейронной сети контроллера и нейронной сети модели объекта управления

В окне **Neural Network Training** (nntraintool) также приведена структура нейронной сети контроллера и нейронной сети модели объекта управления (см. рис. 18) с обратными связями и заданными параметрами. Обучение регулятора занимает весьма значительное время, поскольку обучение использует динамический вариант метода обратного распространения ошибки [16].

### Результаты (Results)

Для проверки результатов обучения регулятора возвращаемся к Simulink-модели системы управления (см. рис. 2) и выбрав опцию **Start** в меню **Simulation** запускаем моделирование. Реакция объекта (ДПТ), управляемого обученной нейросетью с эталонным регулятором, на единичное ступенчатое воздействие приведена на графиках (рис. 19).

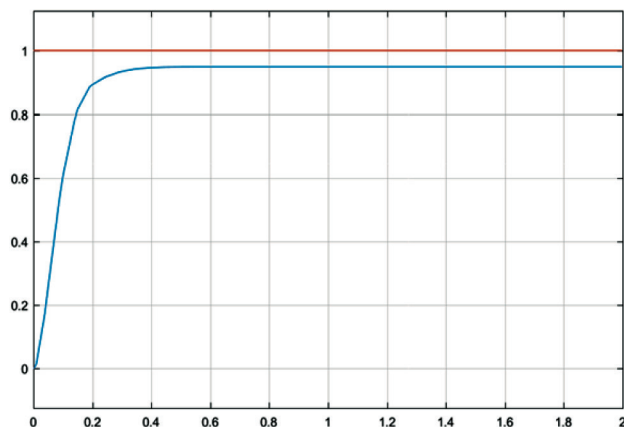


Рис. 19. Реакция системы адаптивного управления с эталонной моделью на ступенчатое воздействие



Как видно из графиков, переходный процесс в обученной нейросети с эталонной моделью имеет монотонный характер и в установившемся режиме практически достигает уровня единичного входного воздействия, что свидетельствует о хорошем качестве нейросетевого регулятора. Из зависимостей (см. рис. 19) переходных процессов построенной модели системы адаптивного управления (с нейросетевым регулятором) и реакции автономной (без регулятора) модели управления того же ДПТ (см. рис. 6) следует, что системе адаптивного управления при одном и том же единичном воздействии удалось обеспечить получение следующих результатов:

- полностью подавить паразитные колебания на выходе системы, возникающие в контуре обратной связи ДПТ, обеспечивая монотонный характер переходного процесса;
- существенно повысить точность регулирования в установившемся режиме с погрешностью, не превышающей 5 %, повысив уровень выходного сигнала с 0,25 В до 0,95 В (практически в 4 раза);
- по показателю быстродействия на единичное воздействие система адаптивного управления полностью соответствует эталонной модели с ПИД-регулятором (см. рис. 9).

### Обсуждение (Discussion)

Как показывает практика, моделирование систем управления по нелинейным моделям, описываемых нелинейными уравнениями, представляет собой более сложную задачу, чем моделирование линейных систем. Данное обстоятельство вынуждает обратиться к нейронным сетям, обладающим нелинейной природой для решения задач, связанных с нелинейными динамическими системами, которые позволяют существенно сократить объем вычислительных ресурсов, требуемых в задачах высокой размерности вектора переменных состояния.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что наличие контуров самонастройки в нейросетевой структуре регулятора и модели управления дают возможность реализовать адаптивное управление, в процессе которого выполняется непрерывная коррекция параметров системы управления в ответ на изменения сигналов ее обратных связей и внутренних состояний. Несмотря на значительные затраты времени, расходуемого на обучение, реализуемое в системе адаптивное управление существенно расширяет область применения нейросетевых регуляторов при управлении сложными и нелинейными объектами высокого порядка размерности.

### Выводы (Summary)

На основе результатов синтеза системы адаптивного управления электроприводом с эталонной моделью нейросетевого регулятора можно сделать следующие выводы:

1. Синтезированная система с эталонной моделью нейросетевого регулятора относится к классу адаптивных систем управления, в которых контуры адаптации функционируют по замкнутому циклу с непрерывной коррекцией параметров системы в ответ на изменения внешних и внутренних условий. При этом с ростом числа контуров настройки (адаптации) в системе повышается порядок, влияющий на динамику замкнутой системы, ее устойчивость и робастность.
2. Нейросетевой регулятор эталонной моделью является более предпочтительным при управлении нелинейными объектами, так как используемые им нейросети, нелинейные по своей природе, наилучшим образом позволяют решать задачи с нелинейностями.
3. Показано при обучении нейросетевых моделей объекта управления и регулятора, что значения среднеквадратических ошибок характеристик производительности обучения (см. рис. 13 и 17) настолько малы, что обеспечивают наилучшее решение задачи слежения за траекторией эталонной модели (с минимизацией евклидовой нормы).
4. Практическая значимость адаптивного управления по эталонной модели с применением нейросетевых регуляторов состоит в расширении возможностей для применения к различным классам управляемых процессов [2].

5. Результаты моделирования нейросетевой архитектуры регулятора и объекта управления на примере ДПТ показывают, что адаптивное управление по эталонной модели позволяет в точности отслеживать сигнал задатчика и указывает на робастную устойчивость управления, т. е. гарантировать нечувствительность характеристик поведения регулятора при вариациях параметров модели объекта идентификации в диапазоне, определяемом выбранными параметрами тестовых сигналов в процессе обучения нейросетей объекта и регулятора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Модели и алгоритмы управления объектами водного транспорта в условиях цифровой трансформации : монография / С. О. Барышников, Д. В. Дмитриенко, В. В. Сахаров, А. А. Чертков. — Санкт-Петербург: ООО «Заневская площадь», 2022. — 520 с.
2. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MatLab / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», 2015. — 436 с. — EDN ULLID.
3. Чертков А. А. Алгоритм идентификации параметров моделей производственных функций при помощи нейронной сети / А. А. Чертков, С. В. Сабуров, Я. Н. Каск // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1096–1104. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1096-1104. — EDN AQZOGP.
4. Цвенгер И. Г. Применение нейросетевых регуляторов в системах управления электроприводами / И. Г. Цвенгер, И. Р. Низамов // Вестник Технологического университета. — 2017. — Т. 20. — № 8. — С. 111–114. — EDN VZSIHV.
5. Чертков А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MATLAB / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5(27). — С. 164–171. — EDN SWLTUJ.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. — 2-е изд.; пер. с англ. / С. Хайкин. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2016. — 1104 с.
7. Вакуленко С. А. Практический курс по нейронным сетям / С. А. Вакуленко, А. А. Жихарева. — СПб., Ун-т ИТМО, 2018. — 71 с.
8. Бобцов А. А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, В. В. Григорьев, П. В. Карев [и др.]. — СПб.: Университет ИТМО, 2017. — 134 с.
9. Давидон Б. Автоматическая оптимизация Simulink моделей и регуляторов // Портал научно-практических публикаций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://portalnp.snauka.ru/2013/10/1194> (дата обращения: 01.03.2025)
10. Белов М. П. Синтез нейросетевого регулятора для двухмассовой электромеханической системы привода подачи токарного станка / М. П. Белов, И. С. Носиров, А. М. Белов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. — 2018. — № 8. — С. 70–76. — EDN YNMJVR.
11. Емельянов А. А. Математическое моделирование двигателя постоянного тока в системе относительных единиц в Matlab и Си / А. А. Емельянов, В. В. Бесклеткин, И. М. Агзамов [и др.] // Молодой ученый. — 2019. — № 11(249). — С. 1–7. — EDN ZAHEJV.
12. Wang L. PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink / L. Wang — John Wiley & Sons, Ltd, 2020. — 344 p. DOI: 10.1002/9781119469414.index.

## REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., D. V. Dmitrienko, V. V. Sakharov and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy upravleniya ob'ektami vodnogo transporta v usloviyakh tsifrovoy transformatsii* SPb: Izd. «Zanevskaya ploschad'», 2022: 520.
2. Sakharov, V. V., A. A. Kuz'min and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov na ob'ekтах vodnogo transporta v srede MatLab* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiralа S. O. Makarova, 2015: 436.

3. Chertkov, A. A., C. V. Saburov and Ya. N. Kask. "Algorithm for identifying parameters of production function models using a neural network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1096–1104. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1096-1104.
4. Tsvenger, I. G. and I. R. Nizamov. "Primenenie neyrosetevykh regulyatorov v sistemakh upravleniya elektropivodami." *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* 20.8 (2017): 111–114.
5. Chertkov, A. A., D. S. Tormashev and S. V. Saburov. "Dynamic systems parametric arrange by means pid tuner in matlab." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 164–171.
6. Khaikin, Simon. *Neural Networks: A Complete Course*. 2nd Edition. with anrl. Moscow: Williams Publishing House, 2006: 1104.
7. Vakulenko, S. A. and A. A. Zhikhareva. *Prakticheskiy kurs po neyronnym setyam*. SPb.: Universitet ITMO, 2018: 71.
8. Bobtsov A. A., V. V. Grigoriev, and P. V. Karev et al. *Actuating devices and systems for micro-movements*. St. Petersburg: ITMO University, 2017: 134.
9. Davidov B. Automatic optimization of Simulink models and controllers Portal of scientific and practical publications Web. 1 Mar. 2025 <<https://portalnp.snauka.ru/2013/10/1194>>
10. Belov, M. P., I. S. Nosirov and A. M. Belov. "Synthesis neural network controller for two-mass electromechanical system of lathe machine's feed drive." *Izvestiya SPbGETU LETI* 8 (2018): 70–76.
11. Emel'yanov, A. A., V. V. Beskletkin and I. M. Agzamov et al. "Matematicheskoe modelirovanie dvigatelya postoyannogo toka v sisteme otnositel'nykh edinit v Matlab i Si." *Molodoy uchenyy* 11(249) (2019): 1–7.
12. Wang, L. *PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink* John Wiley & Sons, Ltd, 2020: 344. DOI: 10.1002/9781119469414.index.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сахаров Владимир Васильевич** —  
 доктор технических наук, профессор  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [\\_saharov\\_@rambler.ru](mailto:_saharov_@rambler.ru)

**Чертков Александр Александрович** —  
 доктор технических наук, доцент  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская 5/7  
 e-mail: [chertkov51@mail.ru](mailto:chertkov51@mail.ru),  
[kaf\\_electricautomatic@gumrf.ru](mailto:kaf_electricautomatic@gumrf.ru)

**Каск Ярослав Николаевич** —  
 кандидат технических наук, доцент  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [rgam2010@yandex.ru](mailto:rgam2010@yandex.ru),  
[kaf\\_electricautomatic@gumrf.ru](mailto:kaf_electricautomatic@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Saharov Vladimir V.** —  
 Grand PhD in Technical Sciences, professor,  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [\\_saharov\\_@rambler.ru](mailto:_saharov_@rambler.ru)

**Chertkov, Alexandr A.** —  
 Grand PhD in Sciences, associate professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [chertkov51@mail.ru](mailto:chertkov51@mail.ru),  
[kaf\\_electricautomatic@gumrf.ru](mailto:kaf_electricautomatic@gumrf.ru)

**Kask, Yaroslav N.** —  
 PhD  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [rgam2010@yandex.ru](mailto:rgam2010@yandex.ru),  
[kaf\\_electricautomatic@gumrf.ru](mailto:kaf_electricautomatic@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 12 июня 2025 г.  
 Received: June 12, 2025.

## FORMALIZATION OF THE STRUCTURAL COMPLEXITY OF SOFTWARE AS A FACTOR IN THE DESIGN ASSESSMENT OF ITS RELIABILITY

**A. P. Nyrkov, V. V. Korotkov, V. D. Gaskarov**

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

*This study is devoted to one aspect of designing automated control systems for water transport facilities, such as logistics centers, container terminals, ports, ship repair yards, shipping companies, and lock navigation channels on regulated inland waterways. The problem of developing a methodology for the quantitative design assessment of the structural complexity of software under development is considered, since this complexity is a significant factor in assessing its reliability, and increasing complexity inevitably leads to various types of vulnerabilities in program code. A set of factors on which structural complexity depends is defined. A corresponding set of terms is introduced to designate these factors assuming the use of a modular development principle: module call spectrum, module alternative spectrum, module depth, module cyclicity, weighted module depth, weighted module cyclicity. The expediency of transitioning to the corresponding dimensionless indicators is justified. Building on the previously formulated multiplicative method of aggregating a general system integral indicator from a set of partial indicators, a final formula for the design indicator of structural complexity of automated control system software is provided, and a method for including it in the design assessment of the overall reliability of the control loop is proposed. A metric for vector evaluation of differences in structural complexity among alternative software products is introduced.*

*Key words: automated control system, water transport, project, software module, structure, complexity, reliability.*

### For citation:

Nyrkov, Anatoliy P., V. V. Korotkov and V. D. Gaskarov. "Formalization of the structural complexity of software as a factor in the design assessment of its reliability." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 17.4 (2025): 613–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-613-620.

**УДК 004.6:656.6**

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАК ФАКТОРА ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ ЕГО НАДЕЖНОСТИ

**А. П. Нырков, В. В. Коротков, В. Д. Гаскаров**

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

*Исследование посвящено одному из аспектов проектирования автоматизированных систем управления объектами водного транспорта, такими как контейнерные терминалы, порты, судоремонтные предприятия, судоходные компании, шлюзованные судоходные каналы на регулируемых внутренних водных путях. Рассмотрена проблема создания методики проектной количественной оценки структурной сложности разрабатываемого программного обеспечения, поскольку указанная сложность является существенным фактором для оценки его надежности, а повышение сложности неизбежно приводит к возникновению различного рода уязвимостей в программном коде. Определена совокупность факторов, от которых зависит структурная сложность. Введена совокупность терминов для обозначения этих факторов при использовании модульного принципа разработки: «спектр модуля по вызовам», «спектр модуля по альтернативам», «глубина модуля», «цикличность модуля», «взвешенная глубина модуля», «взвешенная цикличность модуля». Обоснована целесообразность перехода к соответствующим безразмерным показателям. В развитие сформулированного ранее мультипликативного способа агрегирования общесистемного интегрального показателя из набора частных показателей приведена итоговая формула показателя проектной структурной*



*сложности программного обеспечения автоматизированной системы управления и предложен способ его включения в проектную оценку общей надежности контура управления. Введена метрика для векторной оценки различия структурной сложности альтернативных программных продуктов.*

*Ключевые слова: автоматизированная система управления, водный транспорт, проект, программный модуль, структура, сложность, надежность.*

**Для цитирования:**

Нырков А. П. Формализация структурной сложности программного обеспечения автоматизированной системы управления как фактора проектной оценки его надежности / А. П. Нырков, В. В. Коротков, В. Д. Гаскаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 613–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-613-620. — EDN ZFQGEC.

## **Введение (Introduction)**

Оценка надежности автоматизированной системы управления является многофакторной. Эта многофакторность системно проявляется во взаимодействии аппаратного контура, программного обеспечения и больших данных, а внутри программ — взаимодействие их алгоритмически различных фрагментов. Понятие *сложность технической системы* концептуально связано с понятием *большая система*. Это последнее в рамках «общей теории систем» в 1930-е гг. исследовал в своих работах Л. фон Берталанфи, в 1950–70-е гг. предлагалось множество различных подходов к определению системы (М. Месарович, Л. Заде, Р. Акофф, Ю. А. Урманцев и др.). Исследования, связанные с этим понятием, не потеряли актуальность до настоящего времени.

Формальное определение такой сложной технической системы, как АСУ в целом, так и ее подсистемы — программного обеспечения, с учетом возможных вариантов предполагает следующие ключевые особенности (например, [1], [2]):

- *структурированность* — применительно к ПО АСУ это выражается в модульном принципе его построения
- *несводимость* функциональных свойств целостной системы к формальному объединению свойств составляющих элементов (эмерджентность);
- *многообразие* связей между элементами; применительно к ПО АСУ это выражается в многообразии и глубине последовательных (каскадных) вызовов модулей;
- *стохастичность* как проявление частотной устойчивости некоторых событий (закон больших чисел);
- *случайность* как наступление редких (нежелательных) событий, не имеющих частотной характеристики
- *реактивность* по отношению к внешней среде — в случае ПО в качестве таковой следует считать информационные потоки, поступающие в аппаратный контур.

Проблема влияния структурной сложности большого программного комплекса на надежность его работы представляется недостаточно изученной. Важной вехой является монография [3], в которой обобщен большой массив отечественных и зарубежных исследований, получивших дальнейшее развитие в ряде более поздних публикаций [4]–[13]. В работах [3]–[5] доминирующими по надежности ПО являются ошибки в его проектировании. Разработка проекта ПО предполагает формирование модульной структуры с ее многообразными связями по вызовам и данным. Этот тезис развивается в данной работе в следующей трактовке: структурная сложность ПО, оцениваемая адекватно сформированным интегральным количественным показателем, может и должна рассматриваться как важный фактор прежде всего проектной надежности (в противопоставлении с эксплуатационной). В ряде публикаций, в частности, [6]–[8], не рассматривается в явной форме структурная сложность ни в качественном, ни в содержательном плане, ни в плане формализованной количественной оценки.

Авторы публикаций [9–12] для оценки структурной сложности программного обеспечения предлагают использовать вероятностный подход. В [9] для учета влияния «архитектуры», т. е. структуры, ПО предложена формула для определения среднего времени простоя из-за программ-



ных сбоев, которая имеет вид математического ожидания и использует априорные либо статистически проявленные вероятности появления ошибок программирования, независимо сгруппированные по уровням. Таким образом, та часть общей надежности, которая относится к архитектуре ПО, имеет размерность времени. Представляется, что соответствующий показатель должен быть безразмерным, так как это упрощает его включение в общий интегральный показатель (тоже безразмерный) в виде коэффициента одного из множителей [14]. Кроме того, использование вероятностей программных сбоев предполагает тестовую эксплуатацию системы управления, что неприемлемо для ранних стадий проектирования ПО АСУ.

Таким образом, целью работы является агрегирование количественной оценки структурной сложности программного обеспечения на стадии проектирования для прогноза его надежности. В рамках поставленной цели решаются задачи выделения факторов структурной сложности и учета их совместного влияния.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Методологические предпосылки.* Рассмотрим априорные предпосылки для формального определения интегрального показателя. При построении количественного показателя структурной сложности ПО АСУ будем исходить из предпосылки систематического использования разработчиками принципов структурного программирования (в частности, модульного принципа и отказа от операторов безусловного перехода типа *go to*). В этом случае структуру ПО можно представить связным ориентированным графом  $G$  без кратных ребер с одним шарниром (входом в систему), с выходящими из него ребрами к не взаимодействующим между собой функциональным подсистемам (за исключением, возможно, доступа к общим данным). Отдельным вершинам при этом соответствуют программные модули, ребрам — обращения к другим модулям.

Представляется, что при отказе от использования рекурсий (укорачивающих код, но увеличивающих расход памяти и затрудняющих отладку) сложность структуры ПО должна учитывать следующие характеристики каждого модуля, входящего в программный комплекс АСУ:

- *размер программного кода модуля* в количестве операторов исходного текста на проектно-ориентированном языке высокого уровня либо объем соответствующего исполняемого EXE-файла; эта характеристика должна вычисляться единообразно для всех модулей, чтобы сохранить сопоставимость результатов;
- *спектр модуля по вызовам*, т. е. количество непосредственных обращений из него к другим модулям (количество ребер, выходящих из представляющей его вершины);
- *спектр модуля* по общему количеству используемых альтернатив;
- *глубину модуля*, характеризующую «вертикальную», или «каскадную» вложенность других модулей по вызовам из данного (максимальную по количеству ребер длину *полного* пути, т. е. нециклического (ввиду предположенного отсутствия рекурсий) ориентированного пути из ребер, начинающегося в вершине данного модуля;
- *цикличность модуля* — количество циклов в теле модуля (поскольку вложенность циклов означает явное усложнение его структуры, это должно отражаться в количественном значении цикличности);
- *взвешенную глубину модуля* — суммарную длину программных кодов, образующих путь, длина которого равна глубине модуля;
- *взвешенную цикличность модуля* — суммарную длину программных кодов, образующих циклы, при этом длина вложенных циклов оказывается включенной с соответствующей кратностью в соответствии со сформулированным ранее требованием.

Методологическим основанием для включения в рассмотрение взвешенных показателей является не формализованное, но бытующее в профессиональном программистском сообществе в течение нескольких десятилетий представление о том, что «в среднем» сложность программы, а значит, и частота ошибок программирования пропорциональны длине программы (разумеется, с большой дисперсией) [14].

*Математическая модель показателя структурной сложности.* Опишем параметры модели. Пусть  $n$  — количество (пронумерованных) программных модулей (вершин графа  $G$ ). В данном случае из рассмотрения исключены стандартные библиотечные подпрограммы и функции используемых систем программирования, предполагая их свободными от ошибок.  $A_{n \times n} = (a_{ij})$  — его бинарная матрица смежности [15], [16]:  $a_{ij} = 1$ , если из  $i$  в  $j$  ведет ребро, и  $a_{ij} = 0$  в противном случае.

Введем обозначения для частных характеристик структурной сложности модуля  $i$ :  $l_i$  — размер модуля (вес  $i$ -й вершины), измеряемый его длиной, т. е. числом операторов;  $s_i$  — спектр;  $\gamma_i$  — количество альтернатив, введенных всеми условными операторами;  $h_i$  — глубина;  $c_i$  — цикличность;  $h'_i$  — взвешенная глубина;  $c'_i$  — взвешенная цикличность.

Отдельный полный нециклический путь модуля  $i$  задается упорядоченным набором вершин  $\pi(i) = (i, u_2, \dots, u_t)$ , соответствующих последовательности вложенных вызовов при его исполнении, а именно:

– спектру модуля по вызовам:

$$s_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}; \quad (1)$$

– спектру модуля по альтернативам:

$$\gamma_i = n_i^{if} + n_i^{choice}, \quad (2)$$

где  $n_i^{if}$  и  $n_i^{choice}$  — количество альтернатив, введенных всеми условными операторами модуля типа *if* и *choice*, соответственно;

– глубине модуля:

$$h_i = \max_{\pi(i)} t \quad (3)$$

(если при этом спектр модуля  $s_i = 0$ , то полагаем  $h_i = 0$ );

– взвешенной глубине:

$$h'_i = l_i + l_{u_2} + \dots + l_{u_t}, \quad (4)$$

где суммирование ведется по тем вершинам графа  $G$ , которые задают глубину модуля.

Если значение  $t$  реализуется одновременно на нескольких полных путях:  $\pi_1(i), \dots, \pi_k(i)$ , то полагаем  $h'_i$  равным максимальному из соответствующего набора значений:

$$h'_i = \max_{\pi_j(i)} \{h'_i(\pi_j(i))\}. \quad (5)$$

Пусть  $\zeta(i)$  — какой-либо цикл, содержащийся в модуле  $i$ ,  $l[\zeta(i)]$  — его длина. Тогда, в соответствии с определением взвешенной цикличности, ее значение

$$c'_i = \sum_{\zeta(i)} l[\zeta(i)]. \quad (6)$$

Характеристики структурной сложности (1)–(6) являются размерными, т. е. измеряемыми в принятых единицах длины программы. В то же время желательно иметь аналогичный набор безразмерных характеристик для сравнения разных программ в указанном аспекте. Априори понятно, что короткая программа может с содержательной точки зрения иметь сложную, «запутанную» структуру, и в то же время длинная программа может оказаться структурно простой, например, ее граф может иметь структуру бинарного дерева или даже линейного списка.

Пусть  $L$  — объем ПО в целом,  $N$  — общее количество модулей.

Определим:

– средний спектр модуля по вызовам:

$$S = \left( \sum_i s_i \right) / N; \quad (7)$$

– среднюю глубину модуля по альтернативам:

$$\Gamma = \left( \sum_i \gamma_i \right) / L; \quad (8)$$

– среднюю взвешенную глубину модуля:

$$H' = \left( \sum_i h'_i \right) / L ; \quad (9)$$

– среднюю взвешенную цикличность модуля:

$$C' = \left( \sum_i c'_i \right) / L . \quad (10)$$

Теперь, исходя из мультипликативного принципа построения общего показателя проектной надежности [14] и его частных показателей-множителей, получим проектный показатель структурной сложности ПО АСУ в виде

$$K_{\text{стр}} = S \cdot H \cdot H' \cdot C' \cdot \Gamma . \quad (11)$$

Если на первом этапе проектирования ПО, определяя его архитектуру [14], примем, что длина каждого модуля  $i$  в формулах (3)–(6) равна  $1 + s_i + l_i$  (операторы между вызовами других модулей отсутствуют), получим по формуле (11) значение  $K_{\text{кар}}$ , которое назовем *каркасной сложностью*. Эта модификация дает простой механизм для оценки и сравнения сложности любых программных продуктов без содержательного анализа их полного текста.

Вектор частных структурных характеристик:  $X = (L, S, H, H', C', \Gamma)$ , может быть использован для сравнения альтернативных проектных вариантов, характеризующихся значениями структурной сложности ПО  $X^{(1)}$  и  $X^{(2)}$ , с применением для задания расстояния между строками евклидовой метрики  $\rho_E(X^{(1)}, X^{(2)})$ :

$$\rho_E(X^{(1)}, X^{(2)}) = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (S_1 - S_2)^2 + (H_1 - H_2)^2 + (H'_1 - H'_2)^2 + (C'_1 - C'_2)^2 + (\Gamma_1 - \Gamma_2)^2} . \quad (12)$$

Если проектировщики имеют основания различать степень важности отдельных компонент вектора  $X$ , то возможна модификация формулы (12), использующая соответствующие веса  $p_j$ ,  $p_j \geq 0$ ,  $\sum_{j=1}^6 p_j = 1$  для квадратов соответствующих разностей.

При вычислении глубины  $h_i$  и взвешенной глубины  $h'_i$  для каждой вершины  $i$  может применяться алгоритм перечисления полных путей из фиксированной вершины в ациклическом ориентированном графе, описанный, например, в [13] и [15, 16].

Построенный в работе [14] интегральный показатель  $H$  проектной оценки надежности АСУ имеет вид

$$H = H_{\text{апп}} \cdot H_{\text{пр}} \cdot H_{\text{дан}} , \quad (13)$$

где  $H_{\text{апп}}$  — надежность аппаратного контура,

$H_{\text{пр}}$  — надежность программного обеспечения,

$H_{\text{дан}}$  — надежность хранения данных.

Теперь можно сделать множитель  $H_{\text{пр}}$  более информативным. Поскольку увеличение структурной сложности ПО должно уменьшать показатель его надежности в соответствии с используемым *принципом мультипликативности*, прежнее значение  $H_{\text{пр}}$  следует разделить на  $K_{\text{стр}}$ :

$$H_{\text{пр}} \leftarrow H_{\text{пр}} / K_{\text{стр}} . \quad (14)$$

Таким образом, построенный показатель применим не только на стадии проектирования, но и к уже функционирующему ПО АСУ, так как он позволяет динамически сопоставлять временную динамику количества выявленных в ходе эксплуатации ошибок с финальным показателем сложности.

## Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussion)

Соблюдение принципа системности при построении проектной оценки надежности программного обеспечения разрабатываемой АСУ транспортной системы с рассредоточенной сетью удаленных объектов, сетевого аппаратного контура, облачных технологий хранения и передачи данных предполагает наряду с другими факторами учет, который необходим на каждой стадии про-

движения проекта структурной сложности программного продукта. До настоящего времени отсутствовали формализованные количественные показатели и методики их построения, которые можно оценить как *системные*, учитывающие различные аспекты структуры.

В данной работе приведен перечень соответствующих факторов, которые позволяют сделать вывод о том, что наряду с очевидным влиянием на надежность длины программы и ее составных частей, необходим учет следующих параметров: спектр модуля по вызовам, спектр модуля по альтернативам, глубина модуля, цикличность модуля. Для обеспечения сопоставимости результатов оценки для разных вариантов ПО следует перейти к безразмерным показателям и использовать мультипликативный способ их агрегирования. Сформированный показатель структурной сложности включается в оценку проектной надежности в степени –1.

### Заключение (Conclusion)

Частью решения общей задачи разработки методики проектной оценки системной надежности АСУ для объектов инфраструктуры водного транспорта является построение оценки надежности программного обеспечения. Методика построения может использовать мультипликативный принцип агрегирования частных характеристик и должна учитывать размер ПО, модульную структуру, глубину последовательных вызовов модулей, а также их количество, набор альтернативных разветвлений, количество циклов. Получаемый при этом показатель структурной сложности влияет на интегральный показатель проектной оценки надежности программного обеспечения по схеме обратной пропорциональной зависимости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков В. Я. Сложные технические системы / В. Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии. — 2017. — № 3 (20). — С. 86–92.
2. Цветков В. Я. Ресурсность и интегративность сложной организационно технической системы / В. Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 5–4. — С. 676. — EDN VVTJIB.
3. Липаев В. В. Надежность программных средств. Сер.: Информатизация России на пороге XXI века / В. В. Липаев. — М: СИНТЕГ, 2018. — 296 с.
4. Климов С. М. Методика оценки функциональной надежности компонент программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления / С. М. Климов, Ю. В. Сосновский, Д. Р. Чачиев // Надежность. — 2025. — Т. 25. — № 1. — С. 58–66. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-58-66. — EDN TXVYZH.
5. Боровиков С. М. Оценка ожидаемой надежности прикладных программных средств для компьютерных информационных систем / С. М. Боровиков, В. О. Казючиц, В. В. Хорошко [и др.] // Информатика. — 2021. — Т. 18. — № 1. — С. 84–95. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-1-84-95. — EDN AHDRQC.
6. Мякишев Д. В. Принципы и методы создания надежного программного обеспечения / Д. В. Мякишев. — М: Инфра-Инженерия, 2025. — 112 с.
7. 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.
8. Наумов А. А. Надежность программного обеспечения и методы ее повышения / А. А. Наумов, А. Р. Айдинян // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 2(49). — С. 98. — EDN VAQUWA.
9. Тынченко В. В. К вопросу оценки надежности программного обеспечения с многоуровневой архитектурой / В. В. Тынченко, Р. Ю. Царев // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2–1. — С. 204. — EDN UHWZRD.
10. Рогова Д. В. Особенности использования структурного подхода при разработке надежного программного обеспечения / Д. В. Рогова, А. Г. Суворов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 томах, Красноярск, 12–16 апреля 2021 года — Красноярск: Федеральное государственное бюд-

жетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», 2021. — С. 358–360. — EDN COMMSF.

11. Nyrkov A. Mathematical Models for Solving Problems of Reliability Maritime System / A. Nyrkov, K. Goloskokov, E. Koroleva, S. Sokolov, A. Zhilenkov, S. Chernyi // *Advances in Systems, Control and Automation: ETAEERE-2016* — Springer Singapore, 2018. — С. 387–394. DOI: 10.1007/978-981-10-4762-6\_37.

12. Shipunov I. S. Developing a Reliable Information Storage Scheme Within a Partially Unmanned Maritime Convoy / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, D. A. Evtushenko, A. V. Kostenkova, I. V. Li, A. A. Nyrkov // *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)* — 2022. — С. 439–442. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755534.

13. Рванова А. С. Разработка модели оценки структурной сложности программ / А. С. Рванова, Н. С. Кольева, М. В. Панова // *Цифровые модели и решения*. — 2024. — Т. 3. — № 2. — С. 5–16. DOI: 10.29141/2949-477X-2024-3-2-1. — EDN UEZYBI.

14. 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.

15. Юмашева Е. С. Интеграция графовых моделей для обнаружения аномалий в сетевом трафике / Е. С. Юмашева, А. П. Ныркков // *Перспективы науки*. — 2025. — № 6(189). — С. 102–107.

16. Куделя В. Н. Методы перечисления путей в графе / В. Н. Куделя // *Научные исследования в космических исследованиях Земли*. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 28–38. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-28-38. — EDN HQEASN.

## REFERENCES

1. Tsvetkov, V. Ya. “Complex technical systems.” *Educational Resources And Technologies* 3(20) (2017): 86–92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-3-86-92.

2. Tsvetkov, V. Ya. “Resursnost’ i integrativnost’ slozhnoy organizatsionno tekhnicheskoy sistemy.” *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental’nykh issledovaniy* 5–4 (2016): 676.

3. Lipaev, V. V. *Nadezhnost’ programmnykh sredstv. Ser.: Informatizatsiya Rossii na poroge XXI veka* M: SINTEG, 2018: 296.

4. Klimov, S. M., Yu. V. Sosnovskiy and D. R. Chachiev. “A methodology for evaluating the functional dependability of the components of an embedded software and hardware microprocessor-based control system.” *Dependability* 25.1 (2025): 58–66. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-58-66.

5. Borovikov, S. M., V. O. Kazyuchits and V. V. Khoroshko [i dr.]. “Assessment of expected reliability of applied software for computer-based information systems.” *Informatics* 18.1 (2021): 84–95. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-1-84-95.

6. Myakishev, D. V. *Printsipy i metody sozdaniya nadezhnogo programmnogo obespecheniya* M: Infra-Inzheneriya, 2025: 112.

7. Zvonareva, A. A. and A. O. Tolokonnikov. “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.

8. Naumov, A. A. and A. R. Aydinian. “Software reliability and methods of its improvement.” *Engineering Journal Of Don* 2(49) (2018): 98.

9. Tynchenko, V. V. and R. Yu. Tsarev. “Toward the problem of evaluation of the reliability of software with multiple level architecture.” *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* 2–1 (2015): 204.

10. Rogova, D. V. and A. G. Suvorov. “Features of using a structural approach in developing reliable software.” *Aktual’nye problemy aviatsii i kosmonavтики: Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyaschennoy Dnyu kosmonavтики: v 3 tomakh, Krasnoyarsk, 12–16 aprelya 2021 goda* Krasnoyarsk: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya “Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva”, 2021: 358–360.

11. Nyrkov, A., K. Goloskokov, E. Koroleva, S. Sokolov, A. Zhilenkov and S. Chernyi. “Mathematical Models for Solving Problems of Reliability Maritime System.” *Advances in Systems, Control and Automation: ETAEERE-2016* Springer Singapore, 2018: 387–394. DOI: 10.1007/978-981-10-4762-6\_37.



12. Shipunov, I. S., A. A. Nyrkov, et al. "Developing a Reliable Information Storage Scheme Within a Partially Unmanned Maritime Convoy." *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)* — 2022: 439–442. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755534.
13. Rvanova, A. S., N. S. Kol'eva and M. V. Panova. "Development model for assessing the structural complexity of programs." *Digital Models And Solutions* 3.2 (2024): 5–16. DOI: 10.29141/2949-477X-2024-3-2-1.
14. Korotkov, V. 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 im. admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 449–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458.
15. Yumasheva, E. S. and A. P. Nyrkov. "Integrating Graph Models to Detect Anomalies in Network Traffic." *Science Prospects* 6(189) (2025): 102–107.
16. Kudelya, V. N. "Methods for enumerating paths in a graph." *High Technologies In Earth Space Research. H&Es Research* 15.5 (2023): 28–38. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-28-38.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ныркoв Анатолий Павлович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf.koib@gmail.com](mailto:kaf.koib@gmail.com), [nyrkowap@gumrf.ru](mailto:nyrkowap@gumrf.ru)  
**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](mailto:korotkovvv@gumrf.ru)  
**Гаскаров Вагиз Дилляурович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул.  
Двинская, 5/7  
e-mail: [GaskarovVD@gumrf.ru](mailto:GaskarovVD@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nyrkov, Anatoliy P.** — Grand PhD of Technical  
Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime and  
Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg, 198035, Russian  
Federation  
e-mail: [kaf.koib@gmail.com](mailto:kaf.koib@gmail.com), [nyrkowap@gumrf.ru](mailto:nyrkowap@gumrf.ru)  
**Korotkov Vitaliy V.** — Associate Professor of  
Department of Integrated Information Security,  
Admiral Makarov State University of Maritime and  
Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg, 198035, Russian  
Federation  
e-mail: [korotkovvv@gumrf.ru](mailto:korotkovvv@gumrf.ru)  
**Gaskarov Vagiz D.** — Grand PhD of Technical  
Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime and  
Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg, 198035, Russian  
Federation  
e-mail: [GaskarovVD@gumrf.ru](mailto:GaskarovVD@gumrf.ru)

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



Научное издание

# **Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Том 17. № 4**

**2025 год**

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*  
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать 27.08.25. Дата выхода в свет 29.08.25  
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 20,25.  
Тираж 500 (первый завод 40) экз. Свободная цена. Заказ № 527/25

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